



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**LABORATORNÍ METODY TESTOVÁNÍ KLUZNÝCH
LOŽISEK SPALOVACÍCH MOTORŮ**

LABORATORY TESTING METHODS FOR PLAIN BEARINGS FOR COMBUSTION ENGINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Libor Loveček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Libor Loveček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Laboratorní metody testování kluzných ložisek spalovacích motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při vývoji nových materiálů kluzných ložisek v automobilovém průmyslu se používají různé úrovně testování, od základních testů materiálu přes testy ložisek na laboratorních zařízeních s různým zjednodušením až po životnostní testy v reálných motorech. Použití laboratorních zařízení s vyšší mírou modelového zkreslení spolu s vhodnou metodikou testování mohou snížit čas a náklady konvenčních životnostních testů. Práce bude částečně řešena u průmyslového partnera.

Typ práce: výzkumná
Projekt: vývojová zakázka (HS)

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentálně ověřit využitelnost tribometrů v konfiguraci „block-on-ring“ k hodnocení mezních stavů kluzných ložisek spalovacích motorů, a to vůči standardním laboratorním zkouškám.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat tribologické podmínky v kontaktu vzorku a zkušebního tělesa pro různé úrovně testů a navrhnout porovnávací kritérium,
- navrhnout a realizovat konstrukční úpravy univerzálního tribometru v konfiguraci „block-on-ring“,
- navrhnout a ověřit postup testování ložisek na univerzálním tribometru,
- realizovat sérii experimentů a porovnat výsledky s testy na konvenčním zařízení,
- připravit publikaci výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 0123970474

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je nastavit obdobné tribologické podmínky na různých úrovních testování a stanovit výsledné parametry, které lze srovnávat se speciálním testovacím zařízením určeným pro testování kluzných ložisek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kluzná ložiska, Opotřebení, Block-on-Ring, Tribometr

ABSTRACT

The aim of this work is to set similar tribological conditions at different levels of testing and to determine the resultant parameters, which can be compared with a special testing device for testing of journal bearings.

KEYWORDS

Journal bearings, Wear, Block-on-Ring, Tribometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LOVEČEK, L. *Laboratorní metody testování kluzných ložisek spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D., za jeho odborné rady, připomínky a konzultace poskytnuté během zpracování této práce. Velké díky také patří mé rodině, která mě podporovala během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Laboratorní metody testování kluzných ložisek* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Milana Omasty, Ph.D. s využitím informací a zdrojů, které cituji v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....
Libor Loveček

OBSAH

Obsah.....	11
1 Úvod.....	13
2 Přehled současného stavu poznání.....	14
2.1 Úrovně testování kluzných ložisek.....	14
2.2 Druhy testů kluzných ložisek	15
2.2.1 Seizure test.....	15
2.1.2 Start-Stop metodika	15
2.3 Podobnostní analýza	17
2.3.1 Stribeckovo číslo	17
2.3.2 Sommerfeldovo číslo.....	18
2.3.3 Parametr mazání	18
2.3.4 Výpočet minimální tloušťky mazacího filmu.....	19
2.4.1 Opotřebení	24
2.4.2 Součinitel tření.....	27
2.4.3 Teplota	27
3 Analýza problému a cíl práce.....	28
3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z řešerše	28
3.2 Cíl diplomové práce	28
4 Materiály a metody.....	29
4.1 Metodologie.....	29
4.2 Popis testovacích zařízení.....	30
4.2.3 Konfigurace Block-on-Ring, Rtec.....	30
4.2.3 Zařízení s konfigurací Block-on-Ring , Bruker.....	33
4.2.3 Zařízení pro testování ložisek.....	34
4.3 Materiály.....	35
4.3.1 Vzorek ložisek	35
4.4.3 Testovací kroužek.....	36
4.4.4 Mazivo	36
4.5 Hodnocení množství opotřebeného materiálu	36
4.5.1 Optická profilometrie	36
5 Výsledky	37
5.1 Teoretická predikce chování jednotlivých úrovní testování.....	37
5.2 Experimentální výsledky - nekonformní kontakt.....	38
5.2.1 Test k určení Stribeckovy křivky – Rtec.....	38
5.2.2 Test opakovatelnosti – Rtec.....	39
5.2.3 Test opakovatelnosti – Rtec + konstrukční úpravy	41
5.2.4 Test k určení Stribeckovy křivky – Bruker	42
5.2.5 Test opakovatelnosti – Bruker.....	43
5.3 Experimentální výsledky - konformní kontakt.....	44
5.3.1 Porovnání Stribeckovy křivky – Rtec, Bruker (konf., nekonf.) Speciální zařízení.....	44
5.3.2 Porovnání Stribeckovy křivky – Bruker, Speciální zařízení	45
5.3.3 Vyhodnocení konformního kontaktu Block on Ring + určení opakovatelnosti měření - Bruker	46
5.3.4 Start-stop test – Bruker, Speciální zařízení	49
6 Diskuze.....	52

6.1 Nekonformní konfigurace Block-on-Ring.....	52
6.3 Srovnání chování jednotlivých konfigurací.....	53
6.2 Konformní konfigurace Block-on-Ring.....	54
7 Závěr	55
8 Seznam použitých zdrojů	56
9 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....	59
10 Seznam obrázků a grafů.....	60
11 Seznam tabulek	62
12 Seznam příloh.....	63

1 ÚVOD

1

Kluzná ložiska nalézají uplatnění u mnoha strojních zařízení. Od nejjednodušších zařízení (např. kuchyňský mixér) až po vysoce sofistikované stroje (např. spalovací motory dopravních prostředků). Každá skupina strojů pracuje za jiných podmínek a má tedy jiné požadavky na provedení ložiska. Hlavní parametry ovlivňující chod ložiska jsou materiál ložiska, geometrie ložiska, únosnost a životnost ložiska. Únosnost a životnost je možné analyticky predikovat, avšak tento způsob je pouze orientační a je nutné ložiska experimentálně testovat.

Testování kluzných ložisek lze provádět na několika úrovních. První úroveň je test v daném zařízení za provozu. Tento test je časově nejnáročnější a nejdražší. Ve druhé úrovni se daný stroj testuje v laboratorních podmínkách. Během tohoto zrychleného testu se simulují ztížené podmínky stroje. Tato metoda je časově úspornější, avšak také velmi nákladná. V třetí úrovni se zkoušky provádí pomocí modelového testeru. Pod tímto pojmem si můžeme představit specializované zařízení, které je schopno vytvořit extrémní podmínky, a tím jsme schopni zrychlit čas testování a také náklady jsou zpravidla výrazně nižší [9].

U průmyslového partnera již existuje speciální (konvenční) zařízení sloužící k testování kluzných ložisek, které je schopno simulovat ztížené podmínky probíhající v ojnicím ložisku spalovacího motoru. Na tomto zařízení se provádí únavový test, test odolnosti proti zadírávání a test na opotřebení. Testování na již zmíněném speciálním zařízení je však stále velmi časově a finančně náročné.

Nabízí se tedy otázka, zda můžeme provádět stejné testy na univerzálním laboratorním zařízení (Bruker, R-tek) s konfigurací Block-on-Ring, a tím zkrátit časový průběh testů a zmenšit cenovou náročnost. K tomuto účelu je nutné nejdříve porovnat tribologické chování zmíněných konfigurací jak na teoretické, tak experimentální úrovni. Pokud bude možné porovnávat jednotlivé úrovně testování, je nutné vyhodnotit parametry, které definují odolnost materiálu vůči opotřebení a jsou přenositelné na různé modelové úrovně testování.

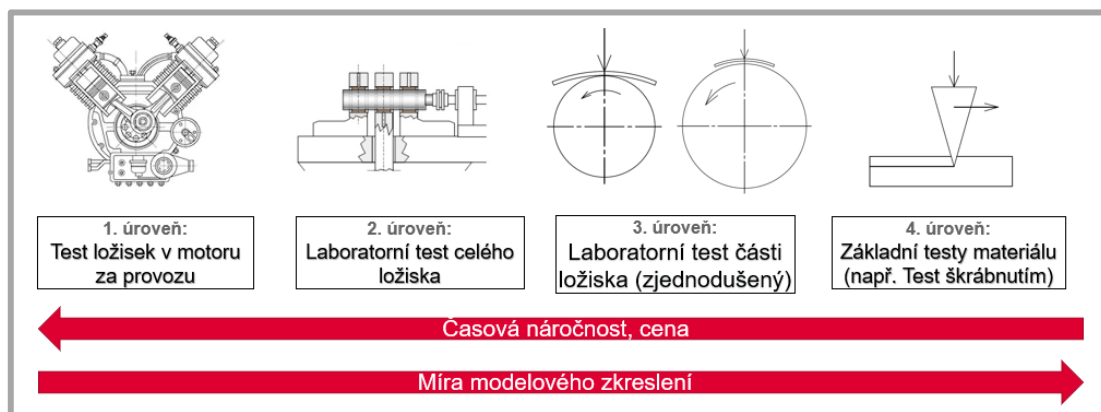


Obr. 1 Ojnice s kluzným ložiskem [4].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Úrovně testování kluzných ložisek

Testování kluzných ložisek lze provádět na několika úrovních. První úroveň je testování celého motoru za provozu. Tento test poskytuje finální vyhodnocení provedení celého systému během aplikace, a to je časově nejnáročnější a nejdražší. Ve druhé úrovni se konkrétní komponenta stroje (např. kluzné ložisko) testuje za ztížených podmínek v laboratorním zařízení. Oproti první úrovni je druhá metoda časově úspornější, avšak stále velmi nákladná. V třetí úrovni se testují části kluzných ložisek. Jedná se o konfigurace s názvem „Block-on-Ring“, kde testovacímu kroužku (hřídeli) je přitlačena malá vyseč kluzného ložiska. Konfiguraci lze rozdělit na konformní a nekonformní variantu. (viz Obr. 2). Jejich výhodou je schopnost testovat ložiska nezávisle na výrobci ložisek, jelikož mohou být použity parciální ložiska ze sériové výroby. Nekonformní varianta je vhodná k určení materiálových charakteristik ložisek. Její nevýhodou je omezená přenositelnost výsledků získaných na této modelové úrovni z důvodu malého liniového kontaktu způsobeného velkým rozdílem průměrů bloku a hřídele [9,24]. Tato konfigurace je určena pro testy s velkým kontaktním tlakem [25]. Konformní varianta má mnohem větší kontaktní plochu oproti nekonformní. Je vhodná pro výzkum opotřebení (převážně odření, tzv. „*scuffing*“) mazaných kluzných kontaktů. Jeho nevýhodou je nutnost velmi přesného ustavení vzorku vůči testovacímu kroužku, což může být časově velmi náročné [25,24]. Poslední úrovní jsou základní testy materiálů sloužící pouze k určení materiálových vlastností (např. součinitel tření).



Obr. 2 Jednotlivé úrovně testování kluzných ložisek

Práce se zabývá srovnáním 2. a 3. úrovně z hlediska tribologického chování mazaného kontaktu ložiska s hřídelí. Pro laboratorní testy celých ložisek jsou již prováděny konkrétní testy, které je snaha provádět za obdobných podmínek také na zjednodušených testech menší části kluzných ložisek. Tento proces má primárně za úkol zlevnit a zkrátit časovou náročnost testů.

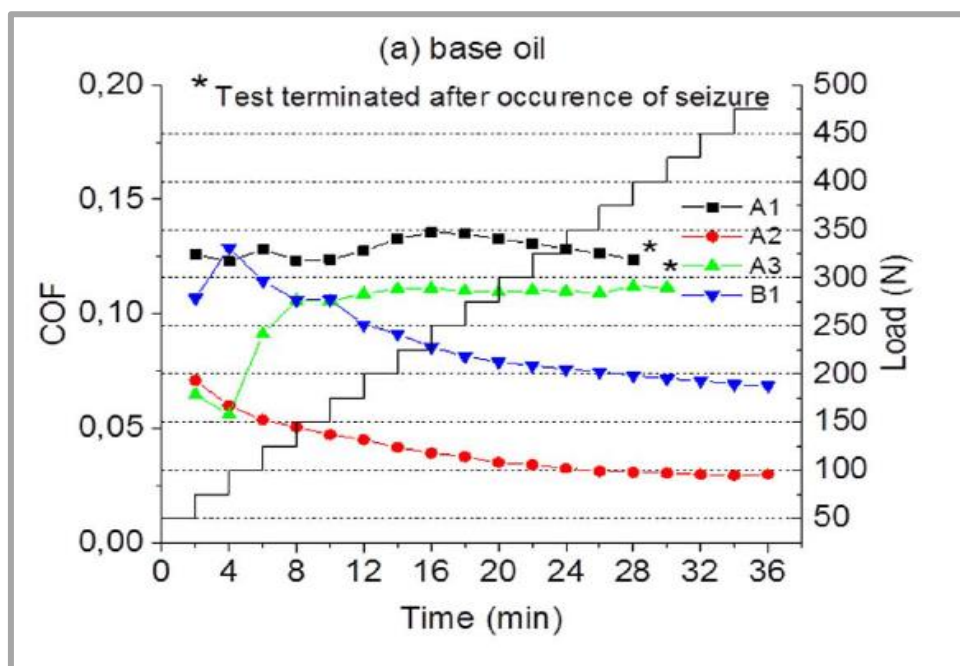
2.2 Druhy testů kluzných ložisek

V praxi se nejčastěji provádí 3 základní typy testů kluzných ložisek. Jedná se o test na odolnost proti zadření („Seizure test“), test na opotřebení („Wear test“) a únavový test („Fatigue test“). Zmíněné testy se běžně dělají na konvexním zařízení u průmyslového partnera. Univerzální tribometry využívající konfiguraci „Block-on-Ring“ však nejsou dimenzovány na únavový test, tudíž není nutné se jím dále zabývat.

2.2.1 Seizure test

Test na odolnost proti zadření neboli také metoda Underwood slouží k nalezení únosnosti ložiska. Jedná se o statický test, při kterém zvyšujeme specifické zatížení ložiska až do zadření, které se detekuje nárůstem teploty nebo třecího momentu na hřídeli (popř. na testovacím kroužku, to záleží na daném zařízení) [9].

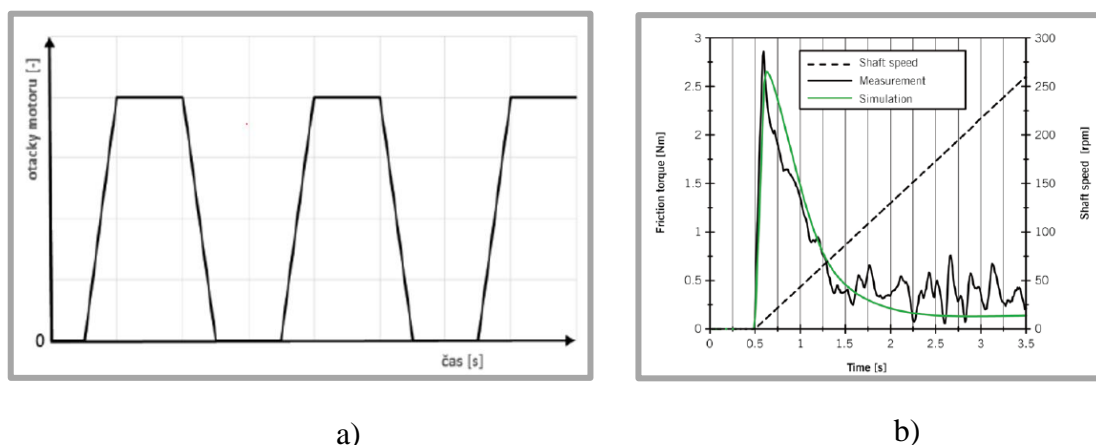
Zatížení má schodovitý tvar, kdy po skončení každého intervalu dochází ke skokovému navýšení zatížení až do stavu zadření ložiska (viz obr. 3). Zatížení, které předcházelo zadření ložiska, je následně stanovena jako únosnost ložiska. Během těchto testů nejčastěji dochází k adhezivnímu opotřebení, nebo k opotřebení vzniklému z důvodu přehřátí ložiska. Otáčky jsou konstantní během celého testu.



Obr. 3 Schodovitý nárůst zatížení během testu [5]

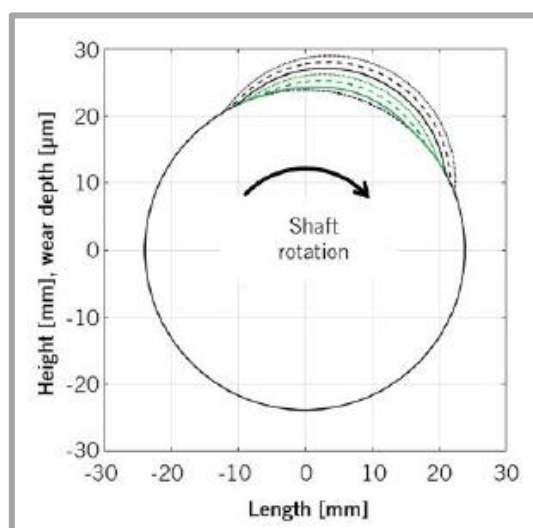
2.1.2 Start-Stop metodika

System Start-Stop je novodobý fenomén mezi funkcemi automobilu. System má za úkol vypnout motor při zastavení vozidla. Při sešlápnutí plynového pedálu se motor zase nastartuje a vozidlo může pokračovat v jízdě. Tato funkce snižuje spotřebu paliva vozidla a emise hluku, a to je především vítáno v městských částech s vysokou hustotou osídlení.



Obr. 4 Průběh testu Start-Stop [9], Nárůst tření v závislosti na zvětšení rychlosti hřídele [15].

Při neustálém vypínání a zapínání motoru dochází ke změně režimů mazání ojnicích a klikových kluzných ložisek. Na základě toho byly také nastaveny průběhy vstupních veličin u laboratorního Start-Stop testu (průběh testu je na obr. 4a). Ložisko pracuje především v režimech mezního a smíšeného mazání, kdy za konstantního zatížení se skokově mění rychlost otáčení hřídele z 0 na danou rychlost a zpět na 0. Tento proces se neustále opakuje po celou dobu testu. Během nárůstu otáček dochází k výraznému nárůstu součinitele tření, který okamžitě klesá do nízkých hodnot kapalinového mazání[15]. Rychlý skok tření (obr. 4b) způsobuje vznik opotřebení ložiska, které se následně po testu vyhodnotí. Určuje se jeho velikost a druh. S každým dalším cyklem se velikost opotřebení lineárně zvětšuje [2]. Narůstá jeho šířka a hloubka opotřebení (obr. 5a), a tím se vytvoří tzv. kráter po celé šířce ložiska. To způsobuje změnu geometrie ložiska, čímž dochází ke ztrátám hydrodynamického tlaku ve filmu mazacího oleje. Během rostoucího opotřebení dochází ke snížení drsnosti povrchu ložiska, což má v zásadě pozitivní vliv na smíšený režim mazání [15].



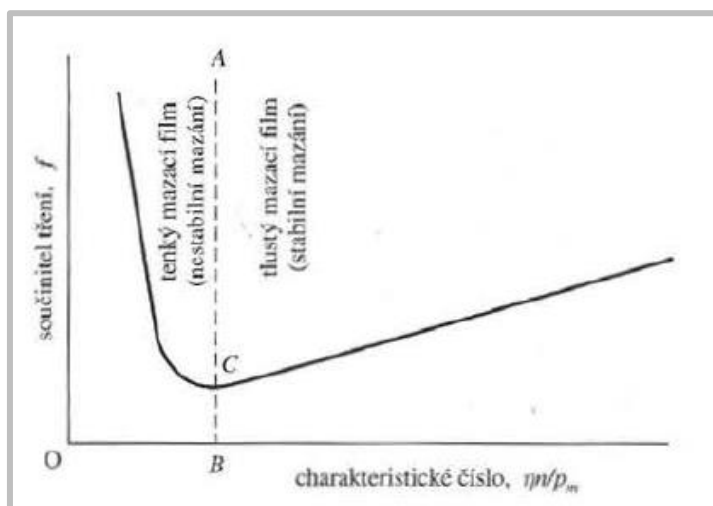
Obr. 5 Rostoucí opotřebení ložiska během průběhu Start-Stop testu [15].

2.3 Podobnostní analýza

Jedním z cílů této práce je analyzovat tribologické podmínky vzorku a zkušebního tělesa pro různé úrovně testů. Je tedy nutné zjistit, k jakému tribologickému chování dochází během testů ložisek na speciálním zařízení a tyto podmínky porovnat s kontaktem konfigurace Block-on-Ring na univerzálním tribometru, jak pro konformní i nekonformní variantu. K tomuto porovnání by měly posloužit podobnostní čísla uvedená v této kapitole.

2.3.1 Stribeckovo číslo

Podobnostní čísla jsou především závislá na zatížení ložiska, rychlosti otáčení hřídele a viskozitě oleje. Změnou těchto veličin se obvykle nastavují různé režimy mazání ložiska [1].



Obr. 6 Stribeckova křivka vyjadřuje přechod mezi stabilním a nestabilním mazáním [2]

Všechny výše zmíněné veličiny zahrnuje tzv. Stribeckovo číslo (2.1), které je určené pro konformní kontakt. Číslo vystupuje v tzv. Stribeckové křivce (obr. 7), kde poloha bodu B značí přechod mezi stabilním a nestabilním mazacím filmem a jeho hodnota je rovna $0,33 \cdot 10^{-6}$. Číslo je uváděno jako bezrozměrné [2].

$$S_{konf.} = \frac{\eta \cdot n}{p_m} \quad (2.1)$$

V literatuře [1] je také uvedeno Stribeckovo číslo pro nekonformní liniový kontakt. Oproti vztahu 2.1 zlomek neobsahuje měrný tlak p_m , ale liniové zatížení w , které lze vypočítat vydělením normálové síly F axiální šířkou kontaktu t [1].

$$S_{nekonf.} = \frac{\eta \cdot u}{w} \quad (2.2)$$

kde u (m/s) je součet rychlostí obou válců (v našem případě má vnitřní větší válec nulovou rychlost, tudíž se do vzorce dosadí rychlost menšího válce). Číslo je bezrozměrné [1].

2.3.2 Sommerfeldovo číslo

Sommerfeldovo číslo má svůj tvar jako předchozí číslo pro konformní i nekonformní kontakt odlišný. Konformní varianta se využívá u výpočtu hydrodynamicky mazaných kluzných ložisek a oproti Stribeckovu číslu zahrnuje také veličiny poloměr kluzného ložiska R a radiální vůli mezi ložiskem a hřídelí c . (viz vztah 2.3). Číslo je uváděno jako bezrozměrné [11].

$$S_{o\ konf.} = \left(\frac{R}{c}\right)^2 \frac{\eta \cdot n}{p_m} \quad (2.3)$$

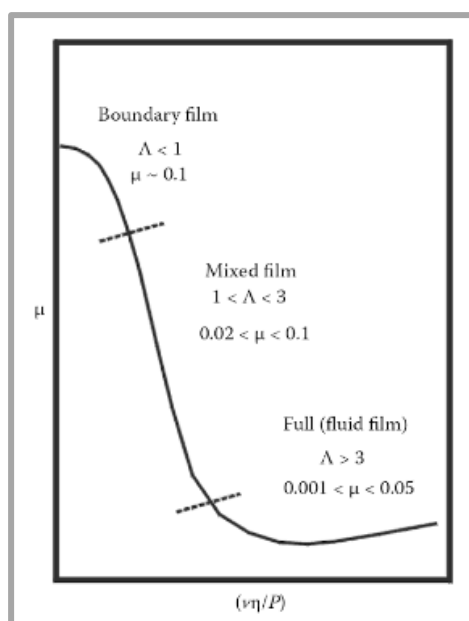
Jeho nekonformní varianta má odlišný tvar, jelikož z důvodu velkého rozdílu průměrů obou kontaktních těles nelze zahrnovat do výpočtu poměr R/c . Vztah zahrnuje šířku kontaktu t [1].

$$S_{o\ nekonf.} = \frac{\eta \cdot n}{t \cdot p_m} \quad (2.4)$$

Pro oba tvary sommerfeldova čísla však nejsou stanoveny žádné okrajové podmínky sloužící ke stanovení režimů mazání dané konfigurace. Lze je použít zvlášť pro srovnání konformních kontaktů, a zvlášť pro nekonformní kontakt.

2.3.3 Parametr mazání

Dalším podobnostním kritériem je parametr mazání (2.5), který do srovnání zahrnuje také minimální tloušťku mazacího filmu h_{min} a redukované drsnosti třecích povrchů R_q . R_{q1} a R_{q2} jsou průměrné kvadratické úchytky profilu povrchů. Parametr je bezrozměrný [1].



Obr. 7 Stribeckova křivka popisující jednotlivé režimy mazání mazaného tribologického kontaktu [22].

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{R_q} \frac{h_{min}}{\sqrt{(R_{q1}^2 + R_{q1}^2)}} \quad (2.5)$$

Podle velikosti parametru mazání se na základě níže uvedených mezních hodnot predikují jednotlivé režimy mazání (obr. 7), a zda dojde k opotřebení ložiska. Mezní hodnoty jsou odhadované z důvodu velkých rozdílů mezi mazanými spoji týkající se zejména velikosti konformity kontaktu, povrchovou strukturu a vlastností maziva [1]. Jednotlivé mezní hodnoty jsou predikovány pro [3]:

- $0 < \Lambda < 1$ nastává opotřebení a deformace materiálu (mezný režim mazání);
- $1 < \Lambda < 1,5$ vyhlazení¹ a vydrolení částic z povrchu materiálu (smíšený režim mazání);
- $1,5 < \Lambda < 3$ vyhlazení nerovností povrchu může nastat, funkčnost povrchu však není ovlivněna (smíšený/EHD režim mazání);
- $\Lambda > 3$ úplné oddělení povrchů mazacím filmem (hydrodynamický režim mazání);

Ze vztahu 2.5 vyplývá, že pro srovnání jednotlivých konfigurací je nutné vypočítat tloušťku mazacího filmu h_{min} .

Na závěr je nutné dodat, že nejvhodnějším porovnávacím parametr mazání, kterým lze oproti ostatním porovnávat kontakty s různou konformitou. Pro stanovení jednotlivých režimů mazání ho využívá také zdroj [26] pro nekonformní kontakt kulíčky s vnitřním válcem (kluzné ložisko).

2.3.4 Výpočet minimální tloušťky mazacího filmu

Teorie pro výpočet h_{min} pro konformní kontakt dle autorů Raimondi, Boyd

Při návrhu kluzných ložisek se mimo jiných využívá teorie „Applying bearing theory to the Analysis and Design of Journal bearing“ od autorů Raimondi a Boyd [11]. Tato teorie slouží k výpočtu chování hydrodynamicky mazaných ložisek, které jsou závislé na řadě veličin rozdělených na závislé a nezávislé. Nezávislé (vstupní) veličiny jsou buď stanoveny, nebo voleny konstruktérem. Do této skupiny patří veličiny [2]:

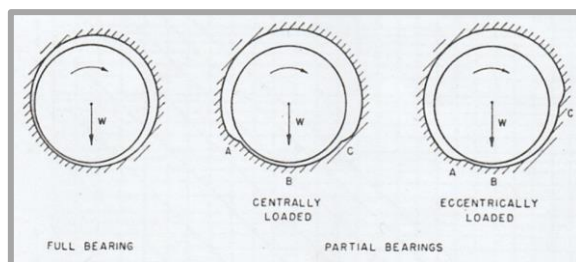
- viskozita maziva η (Pa·s),
- měrné zatížení ložiska p_m (MPa),
- otáčky hřídele n [min⁻¹],
- rozměry ložiska (poloměr ložiska R (Pa·s), radiální vůle c [mm], úhel ložiska β (°) a šířka ložiska L (mm).

Závislé (výstupní) veličiny popisují funkčnost ložiska. Jedná se o veličiny součinitel tření f (-), minimální tloušťka mazacího filmu h_{min} (μm), nárůst teploty maziva Δt (°), aj [2]. Ke stanovení těchto veličin slouží již zmíněné Sommerfeldovo číslo (2.3). Na základě jeho se závislé veličiny stanoví z grafů uvedených ve zdroji [11].

Výpočet lze také provést pro celé i částečné ložisko zatížené ve směru svislé osy. Výpočtový model pro celé ložisko nejlépe odpovídá konfiguraci na speciálním zařízení u průmyslového partnera, i když ojníční kluzná ložiska jsou z konstrukčního hlediska složena ze 2 částí (tzv. upper a lower). Pro výpočet částečného kluzného

¹ U vyhlazeného povrchu je povrchová drsnost zatlačena extrémní plastickou deformací asperit.

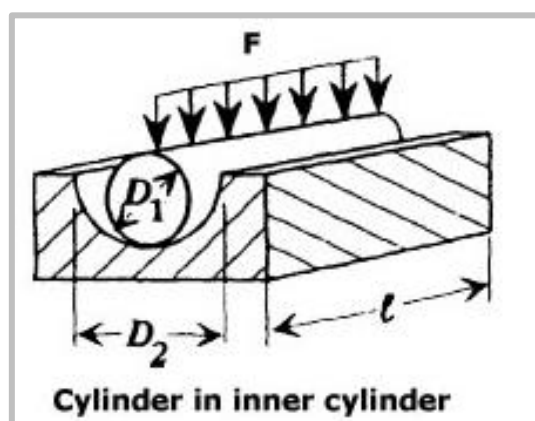
ložiska je vhodné uvažovat ložisko zatížené ve směru svislé osy zobrazené uprostřed na obr. 8. Tento výpočtový model je vhodný pro konformní kontakt vzorku s testovacím kroužkem na konfiguraci block-on-ring.



Obr. 8 Rozdíl mezi celým a částečným ložiskem výpočtového modelu [11].

Výpočet h_{min} dle EHD teorie podle autorů Dowson, Higgins

V této kapitole je popsán výpočet podobnostních kritérií pro liniový kontakt menšího válce s vnitřním větším válcem (obr. 10). Výpočet vychází z *Hertzovy teorie* pro výpočet Sommerfeldova a Stribeckova čísla, a výpočet tloušťky mazacího filmu vychází z *teorie EHD mazání liniového kontaktu*.



Obr. 9 Kontakt menšího válce s vnitřním větším válcem. [12]

Pro výpočet Sommerfeldova a Stribeckova čísla je nutné vypočítat kontaktní a měrný tlak pomocí Hertzovy teorie. Tato teorie je zjednodušena pomocí níže zmíněných předpokladů [3]:

- materiály jsou homogenní a napětí není vyšší jak mez kluzu,
- tangenční síly jsou zanedbány,
- kontaktní oblast je velmi malá ve srovnání s velikostí kontaktních těles,
- tělesa jsou vzájemně v rovnováze,
- zanedbává se drsnost povrchu.

Tyto předpoklady je nutné zahrnout jako nepřesnost výpočtu.

Pře samotným výpočtem tlaků je nutné vypočítat redukovaný poloměr křivosti R' [mm], redukovaný modul pružnosti E' [MPa] a šířku kontaktní oblasti b [mm]. Výpočty těchto veličin se provedou z materiálových (Poissonovo čísla, Moduly

pružnosti) a rozměrových (průměry) charakteristik obou válců a jsou znázorněny na str. 296 ve zdroji [3]. Měrný tlak se vypočte dle vzorce 2.5:

$$p_m = \frac{F}{2 \cdot b \cdot l} \quad (2.6)$$

kde l je šířka ložiska. A kontaktní tlak se vypočte z měrného tlaku pomocí vzorce 2.7.

$$p_{max} = \frac{4}{\pi} p_m \quad (2.7)$$

Výpočet tloušťky mazacího filmu pro liniový kontakt lze provádět dle více autorů, ačkoliv postup výpočtu je u všech obdobný. Nejpřesnější postup výpočtu byl nalezen ve zdroji [12] na stranách 175 až 176 a tento výpočet byl použit pro výpočet minimální tloušťky filmu. Výpočet vychází ze základních bezrozměrných parametrů tloušťky filmu H_{min}^* , rychlosti U^* , zatížení W^* a materiálu G^* .

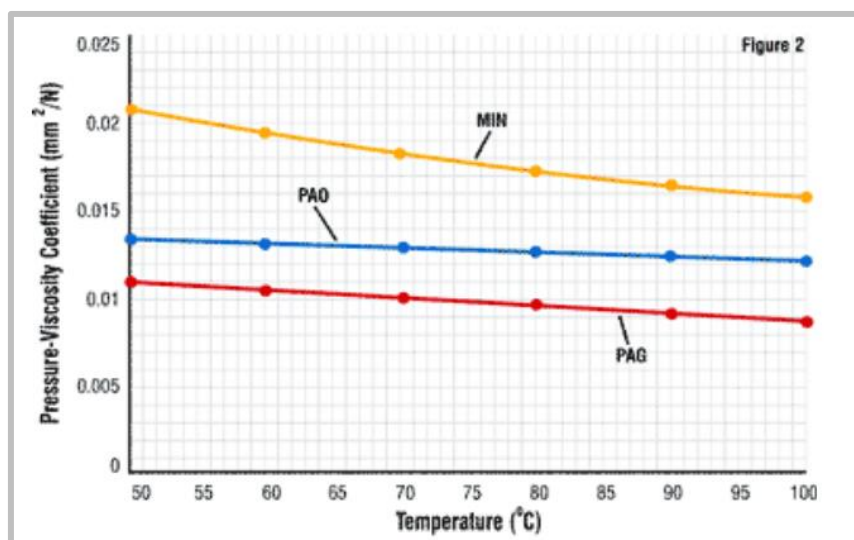
$$H_{min}^* = \frac{h_{min}}{R'} \quad (2.8)$$

$$U^* = \frac{\eta \cdot u}{E' \cdot R'} \quad (2.9)$$

$$W^* = \frac{F}{l \cdot E' \cdot R'} \quad (2.10)$$

$$G^* = \alpha_{oil} \cdot E' \quad (2.11)$$

Veličina $\alpha_{oil}[\text{Pa}^{-1}]$ je Tlak-viskozitní koeficient oleje, který mění svou velikost v závislosti na teplotě. Koeficient má různou hodnotu pro různé druhy olejů (viz obr. 10; minerální olej – MIN, parafinový syntetický olej – PAO, polyalkylene-glycolové syntetické oleje – PAG).



Obr. 10 Závislost tlak-viskozitního koeficientu na teplotě pro jednotlivé druhy olejů [13].

Základní rovnicí pro výpočet parametru H_{min}' je rovnice (2.11) dle autorů Dowson a Higgins. [12]

$$H_{min}^* = 1,654(U^*)^{0,7}(G^*)^{0,54}(W^*)^{-0,13} \quad (2.12)$$

Po dosazení bezrozměrných parametrů do rovnice (2.12) lze dostat přímou rovnici (2.13) pro určení tloušťky mazacího filmu. [12]

$$h_{min} = 1,654 \frac{(\eta U^*)^{0,7}(R')^{0,43}(\alpha)^{0,54}(l)^{0,13}}{(E')^{0,03}(W)^{0,13}} \quad (2.13)$$

Tato rovnice však zahrnuje pouze materiálové vlastnosti, zatížení a rychlost. Člen μU nejvíce ovlivňuje výslednou tloušťku mazacího filmu liniového kontaktu oproti ostatním členům, což je značná nevýhoda rovnice. Další nevýhodou je ta, že rovnice počítá s minimálním elastickým chováním materiálu. Tudíž je nutné do výpočtu zahrnout také konstanty, které počítají také následujícími druhy kontaktů v režimu EHD. [12] K zahrnutí jednotlivých druhů režimů EHD mazání slouží níže uvedené parametry.

$$g_v = \frac{(W^*)^3(G^*)^2}{U} \quad (2.14)$$

$$g_e = \frac{(W^*)^3}{(U^*)^{0,5}} \quad (2.15)$$

$$g_i = g_i(g_v, g_e) = \frac{W^* H_{min}^*}{U} \quad (2.16)$$

Veličina g_v se nazývá bezrozměrným parametrem viskozity, a veličina g_e se nazývá bezrozměrný parametr elasticity. Parametr g_i je funkcí parametrů g_v a g_e , a pro každý druh kontaktu má výpočetní tvar odlišný. [12] Po určení správného druhu kontaktu se vypočítá parametr g_i , a z rovnice (2.16) se vyjádří bezrozměrný parametr H_{min}^* . Tento parametr vynásobíme redukováným poloměrem křivosti R' a získáme tloušťku mazacího filmu h_{min} (viz rovnice 2.8).

Jednotlivé druhy kontaktů v režimu EHD se rozdělují na [3,12]:

- *Isoviscous-Rigid* (elastické deformace jsou malé a můžou být zanedbány, maximální tlak oleje je velmi malý, aby zvyšoval viskozitu) – **parametr g_i** ,
- *Piezoviscous-Rigid* (elast. deformace jsou malé a můžou být zanedbány, ale tlak oleje je výrazně vyšší a zvyšuje viskozitu oleje) – **parametr g_v** ,
- *Isoviscous-Elastic* (elast. deformace kontaktních ploch mají výrazný vliv na vytváření olejového filmu, tlak filmu je buď příliš nízký, aby zvýšil viskozitu, nebo viskozita je výrazně vysoká, aby jí tlak ovlivnil) – **parametr g_i** ,
- *Piezoviscous-Elastic* (tloušťka filmu je řízena kombinovaným účinkem elastické deformace a zvýšením viskozity. Tento režim je formou plně vyvinutého EHD mazání.)

Výpočet h_{min} dle EHD teorie podle autorů Chun, Khonsari

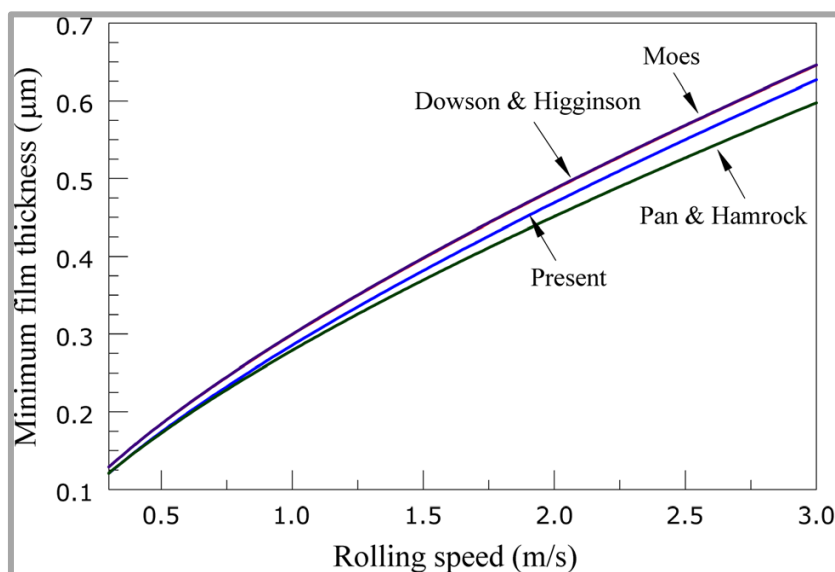
Výpočet minimální tloušťky mazacího filmu dle autorů *Masjedi, Khonsari* [17] vychází z teorie Elastohydrodynamického mazání liniového kontaktu. Pro výpočet tloušťky mazacího filmu využívá tedy stejné bezrozměrné parametry popisované v ředešlé kapitole. Teorie navíc zahrnuje vliv povrchové drsnosti v kontaktu. Je tedy založena na současném řešení Reynoldsovy rovnice a povrchových deformací s přihlédnutím k elastickým, plastickým a elasto-plastickým deformacím nerovností povrchu. Výsledná rovnice výpočtu h_{min} zahrnuje kromě zmíněných bezrozměrných parametrů rychlosti, zatížení a materiálu také bezrozměrný parametr drsnosti $\bar{\sigma}$ a bezrozměrný parametr tvrdosti V . Parametr drsnosti je vyjádřen poměrem redukovanému poměru drsností třecích povrchů R_q k redukovanému poloměru křivosti obou třecích povrchů R' . R_{q1} a R_{q2} jsou průměrné kvadratické úchyly profilu povrchů. Parametr tvrdosti je vyjádřen poměrem tvrdosti hd [Pa] dle Vickerse pro materiál s menší hodnotou tvrdosti (v tomto případě materiál ložiska) k redukovaný modulu pružnosti E' [Pa]. [17]

$$\bar{\sigma} = \frac{R_q}{R'} = \frac{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}{R'} \quad (2.17)$$

$$V = \frac{hd}{E'} \quad (2.18)$$

Po zahrnutí těchto veličin do simulací pro stanovení vzorce pro výpočet minimální tloušťky mazacího filmu autoři publikují rovnici (2.19) jako finální vztah. [17]

$$H_{min}^* = 1,652 W^{*-0,077} U^{*0,716} G^{*0,695} (1 + 0,026 \bar{\sigma}^{1,120} V^{0,185} W^{*-0,312} U^{*-0,809} G^{*-0,977}) \quad (2.19)$$



Obr. 11 Srovnání jednotlivých přístupů výpočtu minimální tloušťky mazacího filmu (povrch je uvažován jako ideálně hladký, $\bar{\sigma} = 0$) [17]

Teorie popisovaná v této kapitole vychází ze systematického přístupu autorů *Pan a Hamrock*. Mezi těmito teoriemi lze vidět na obr. 11 určitý rozdíl (0 ~ 4,5%) ve výpočtu minimální tloušťky mazacího filmu. Tento rozdíl je způsoben použitím jemnější sítě ve výpočtu [17].

Autoři *Chun, Khonsari* [18] dále využívají tuto teorii pro výpočet opotřebení motorových kluzných ložisek během zvyšování a snižování otáček motoru. Zatížení uvažují konstantní [18]. Z tohoto článku tedy vyplývá, že vztah (2.19) lze použít i pro konformní kontakt kluzných ložisek.

2.4 Porovnávací veličiny experimentu

2.4.1 Opotřebení

Selhání mazacího filmu mezi pevnými tělesy nevyhnutelně způsobuje vážné poškození kontaktních ploch těles. Důsledkem toho vzniká opotřebení na kontaktních plochách, které způsobuje změnu tribologického chování kontaktu.

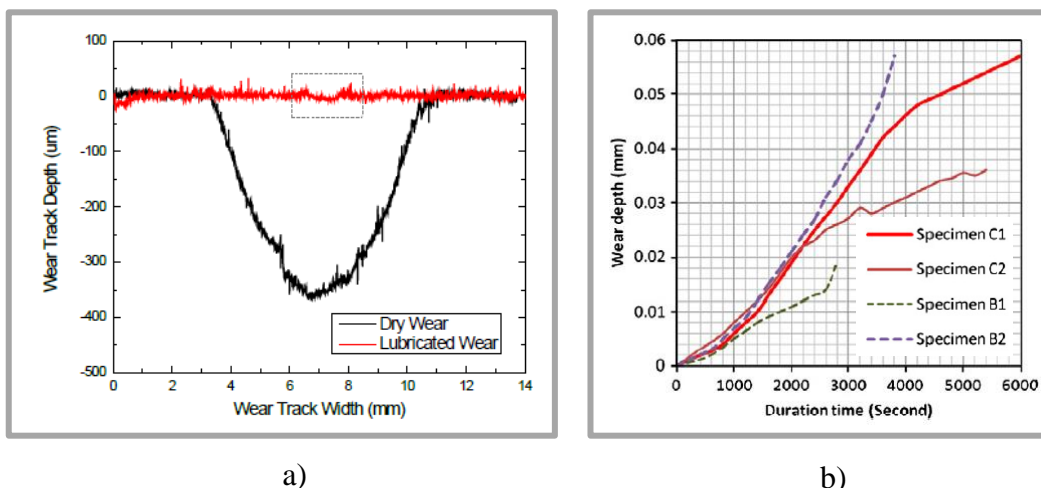
Opotřebení se rozděluje na několik druhů (adhezivní, abrazivní, erozivní atd., viz kap.1 [3]) podle jeho mechanismu vzniku opotřebení, které je ovlivněno faktory:

- chemickými a mechanickými vlastnostmi materiálů,
- pracovním prostředím,
- provozními podmínkami,
- geometrií kontaktních těles.

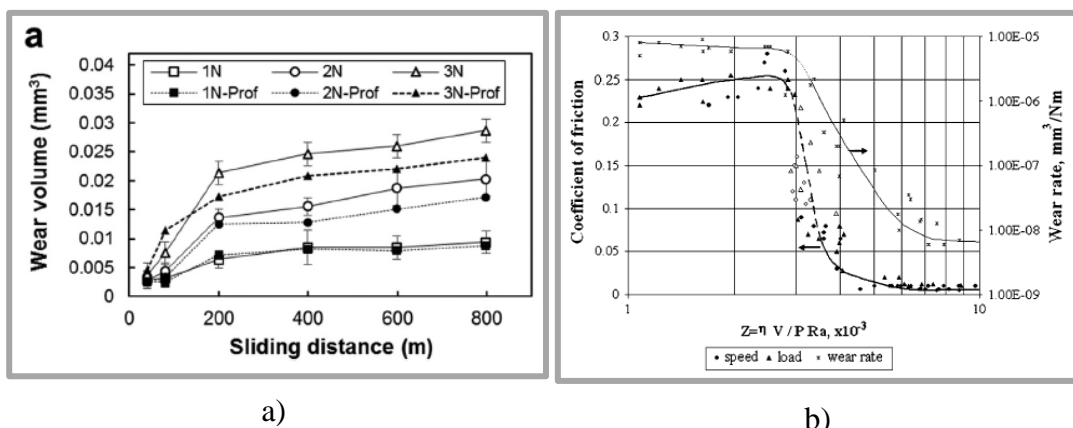
U opotřebovaných ložisek je vhodné také kvantifikovat velikost opotřebení vzniklé během jeho činnosti. Velikost lze vyjádřit pomocí veličin (obr.:

- odebraný objem V [mm³] materiálu ložiska,
- šířka opotřebované oblasti b [mm],
- hloubka opotřebované oblasti d [mm].

Tyto parametry je možné porovnávat pro více materiálů, nebo sledovat vývoj konkrétní veličiny v závislosti na době testu t [s] (obr. 12b), skluzové vzdálenosti S [m] (obr. 13a), zatížení F [N] nebo skluzové rychlosti v [m/s].



Obr. 12 a) Výsledný tvar opotřebení u nekonformního kontaktu Block-on-Ring, [14] b) průběh hloubky opotřebení více materiálů pro konformní kontakt [19].



Obr. 13 a) Závislost objemu odebraného materiálu na skluzové vzdálenosti [26] b) Nárůst koeficientu "Wear rate" a součinitele tření v závislosti na tzv. Schipperově čísle Z [20]

Z obr. 12a lze vidět tvar opotřebené oblasti pro kluzná ložiska. Na povrchu materiálu se vlivem mezního nebo smíšeného režimu mazání začne vytvářet tzv. kráter, jehož hloubka (obr. 12b) i šířka se teoreticky lineárně zvětšují během testu. Při záběhu však dochází k rychlejšímu opotřebení (obr. 13a, skluzová vzdálenost od 0 do 200 m), kdy nastává zarovnání nerovností povrchu. Po záběhu se rychlost opotřebení zpomalí. Stribeckova křivka na obr. 13b zobrazuje výrazný nárůst součinitele opotřebení „Wear rate“ v závislosti na klesající hodnotě tzv. Schipperova čísla Z . [20] Na základě této křivky lze díky opotřebení určit jednotlivé režimy mazání ložiska pro měnící se parametry testu (např. měnící se rychlost hřídele, k čemuž dochází u Start-Stop testu).

Zmíněný součinitel „Wear Rate“ (2.20) slouží k porovnání jednotlivých testů, které neprobíhají za stejných podmínek. Lze ho porovnávat i pro jakoukoliv třecí konfiguraci [23].

$$W = \frac{V}{F \cdot S} \quad (\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}) \quad (2.20)$$

Pro porovnání kluzných ložisek spalovacích motorů na základě velikosti opotřebené oblasti lze použít tzv. koeficient opotřebení k (2.23), jehož výpočet především vychází z již zmíněných veličin hloubka d a šířka b opotřebené oblasti.

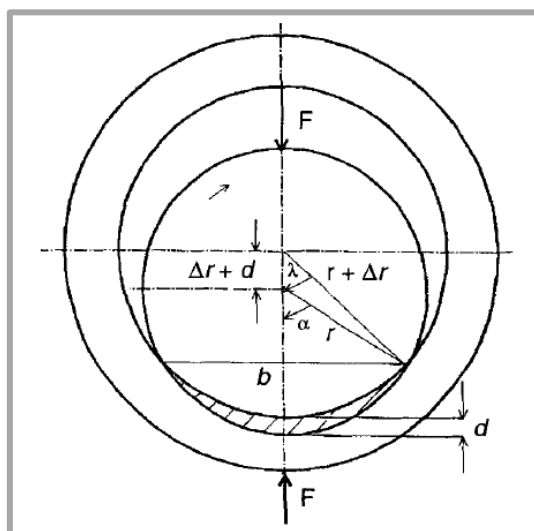
Dále je závislý na [20]:

- měrném tlaku p [Pa],
- poloměru hřídele r [m],
- radiální vůli ložiska Δr [mm],
- celkový počet otáček, které ložisko podstoupilo [-],
- relativní radiální vůli $\zeta = \Delta r / r$ [-],
- relativní hloubce opotřebení $\delta = d / r$ [-],
- úhel od hranice opotřebené oblasti ke středu hřídele α [rad] (2.21),
- úhel od hranice opotřebené oblasti ke středu ložiska λ [rad] (2.22).

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{b}{2r} \right) \quad (2.21)$$

$$\lambda = \arccos \left(\frac{2\zeta + 2\zeta^2 + 2\zeta\delta + \delta^2}{2(\delta + \zeta)(1 + \zeta)} \right) \quad (2.22)$$

$$k = \frac{2\alpha - \sin(2\alpha) - (1 + \zeta)^2(2\lambda - \sin 2\lambda)}{8\pi p N} \quad (2.23)$$



Obr. 14 Schéma znázorňující odstranění materiálu opotřebením v pouzdru ložiska pro stacionární² kontakt [21]

Pro měření velikosti a druhu opotřebení nám slouží zde uvedené jednotlivé metody post analýzy [6,7]:

- **váhová metoda:** měřením rozdílů hmotností lze velmi přesně určit ztráty materiálu kluzného ložiska. Pro měření se využívají přesné váhy, které jsou schopny určit hmotnost v miligramech.
- **mikrometrická metoda:** přímé měření efektů opotřebení. Jedná se o nejčastější a nejběžnější metodu. Pomocí měřicích zařízení nebo mikroskopů s možností mikrometrického měření se odečítají přímo parametry opotřebení. Využívají se různé typy mikroskopů, obrazových analýz, mikrometrická měřidla, 3D stroje...,
- **profilové měření:** velmi často využívaná metoda např. u kráterového opotřebení. Využívá různé typy profilových měřidel (Talysurf 3D), 3D obrazové zpracování, konfokální a digitální mikroskopy, atd.,
- **SEM (Řádkovací elektronový mikroskop)** pro detailní studie prvků obsahující daný povrch, u kluzných ložisek lze touto metodou měřit úbytek jednotlivých prvků z kontaktního povrchu.

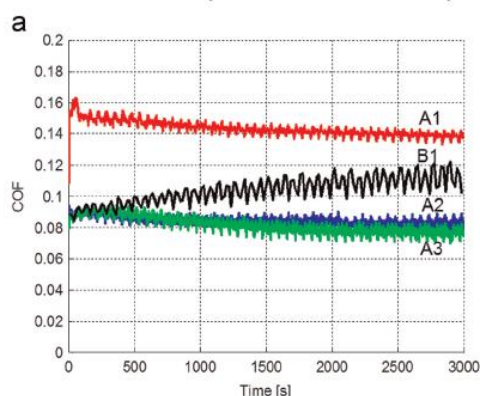
² Stacionární kontakt znamená kontakt pevně uloženého (nepohyblivého) kluzného ložiska s otáčející (pohybující) hřídelí.

- **měření pomocí kontaktního detektoru:** slouží k měření drsnosti, struktury povrchu, nebo obou veličin najednou pomocí velmi ostré kontaktní jehly, která plynule projíždí všechny nerovnosti povrchu s přesností v desetinách mikrometru.

2.4.2 Součinitel tření

2.3.2

Součinitelem tření lze porovnávat tribologické chování jednotlivých materiálů ložiska. Testy je vhodné provádět s konstantními zátěžnými parametry nastavenými tak, aby test probíhal v mezním režimu (obr. 15), aby se vliv materiálových charakteristik projevil co nejlépe. [10]

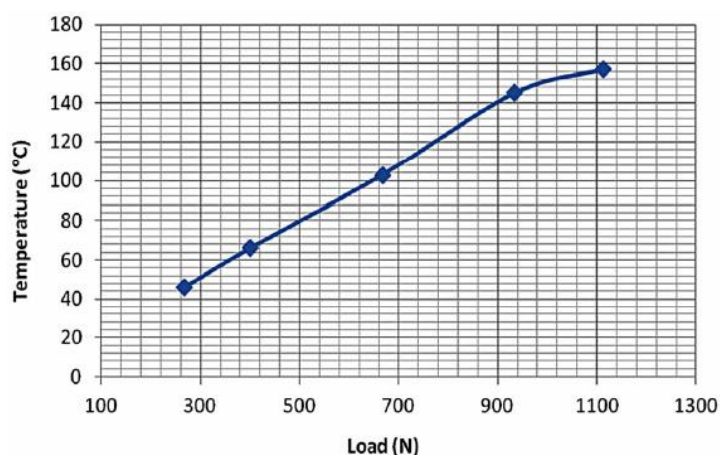


Obr. 15 Srovnání součinitele tření pro jednotlivé materiály testované v mezním režimu mazání [10].

2.4.3 Teplota

2.3.2

Teplota kontaktu ložiska s hřídelí je měřena na zadní straně ložiska. Tento parametr se především měří a kontroluje během testu na odolnost proti zadření, během kterého dochází ke skokovému nárůstu zatížení. Teplota během testu plynule roste (obr. 16), avšak při kontaktu kov na kov rychlost ohřevu vzorku roste s mnohem vyšší směrnicí. V tomto stavu dochází obvykle k zadření či připečení ložiska ke hřídeli [5].



Obr. 16 Závislost teploty vzorku konfiguraci Block-on-Ring na zatížení vzorku. [27].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Konstrukce univerzálních tribometrů umožňuje testovat pouze částečná ložiska, a to ve dvou konfiguracích Block-on-Ring s různou konformitou. Standartní konfigurace využívá nekonformního liniového kontaktu vzorku s testovacím kroužkem. Konfigurace je vhodná pro testy určené k vyhodnocení materiálových charakteristik [9], avšak její nevýhodou je omezená přenositelnost výsledků při srovnání více úrovní testování [24]. Vzniká tedy otázka: „Lze porovnávat jednotlivé konfigurace s různou konformitou na základě jejich tribologického chování?“ Odpověď lze získat pomocí teoretického a experimentálního ověření. Druhá konfigurace využívá konformního kontaktu, kde rozdíly průměrů vzorku a testovacího kroužku jsou řádově v desítkách mikronů. Varianta využívá větší kontaktní plochy oproti její nekonformní variantě a je vhodná pro výzkum opotřebení mazaného kontaktu. Z toho vyplývá, že konformní varianta by měla být teoreticky vhodnější pro nastavení stejného tribologického chování ve srovnání se speciálním zařízením.

U průmyslového partnera se na speciálním zařízení provádí Start-Stop test, test na odolnost proti zadření (tzv. „Seizure test“). Start-Stop test vznikl na základě novodobého automobilního systému Start-Stop, kde ložisko je zatíženo konstantní silou po celou dobu testu, a rychlost otáčení se cyklicky mění z nuly na stanovenou rychlost, a zpět. Test na odolnost proti zadření probíhá za konstantních otáček a skokově rostoucího normálového zatížení. Slouží k nalezení únosnosti ložiska.

Pro porovnání tribologického chování jednotlivých úrovní testování slouží porovnávací kritéria Sommerfeldovo číslo, Stribeckovo číslo a parametr mazání. Nejvhodnějším kritériem je parametr mazání, který oproti zbývajícím číslům zahrnuje do svého výpočtu nejvíce tribologických veličin popisujících daný kontakt. Na základě tohoto parametru lze stanovit podmínky pro experimentální část práce.

Experimenty jednotlivých úrovní lze srovnávat na základě 3 základních měřených veličin. Opotřebení je vhodné porovnávat testovací metodiky Start-Stop. Především se jedná o kvantifikaci odebraného materiálu po testu a stanovení druhu opotřebení. Součinitel tření a teplotu měřenou na zadní straně ložiska je vhodné porovnávat u testu na odolnost proti zadření, jelikož při zadření ložiska dochází k výraznému tření v kontaktu, které je doprovázeno výrazným nárůstem teploty.

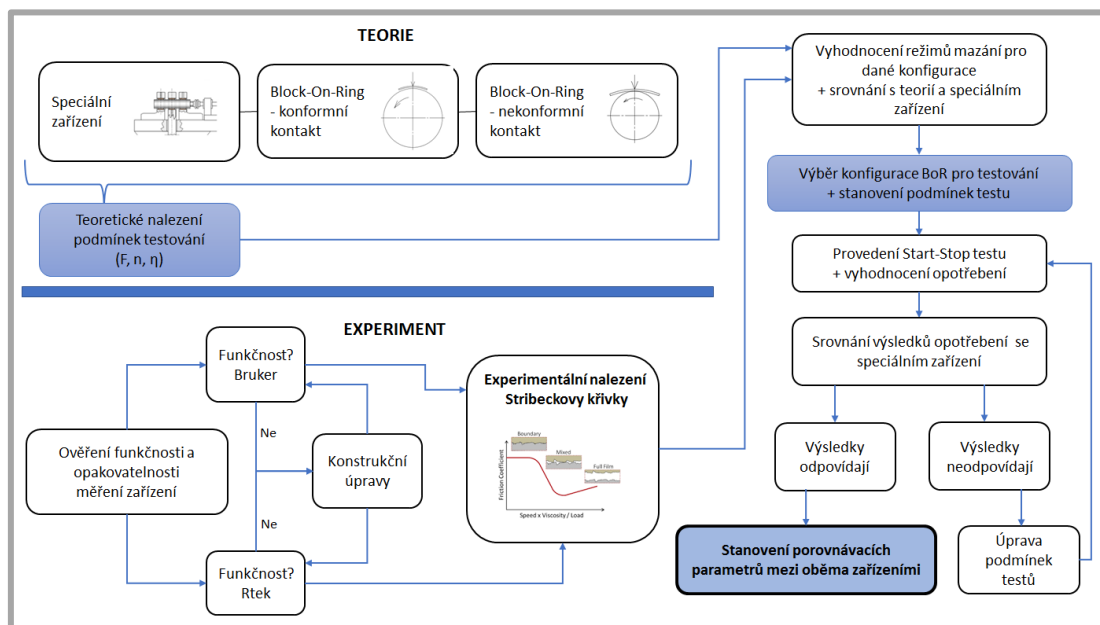
3.2 Cíl diplomové práce

Cílem práce je analyzovat tribologické podmínky v kontaktu ložiska a vzorku pro různé úrovně testování, a podmínky následně porovnat s experimentem pomocí porovnávacího kritéria. Na základě stanovených podmínek realizovat sérii experimentů na univerzálním tribometru a výsledné hodnoty srovnat se speciálním zařízením. Dalším cílem je provést konstrukční úpravy tribometrů, aby byla zajištěna opakovatelnost a funkčnost testování.

Po domluvě s průmyslovým partnerem se experimentální část práce bude zabývat testovací metodikou Start-Stop. Experimenty budou srovnávány na základě koeficientů popisujících velikost opotřebení.

4 MATERIÁLY A METODY

4.1 Metodologie



Obr. 17 Schéma postupu testování práce

Před samotným testováním bylo nutné stanovit tribologické chování jednotlivých konfigurací a srovnat je mezi sebou. Toto srovnání bylo provedeno na základě parametru mazání λ . Na základě této predikce byly stanoveny zátěžné parametry pro Start-Stop test.

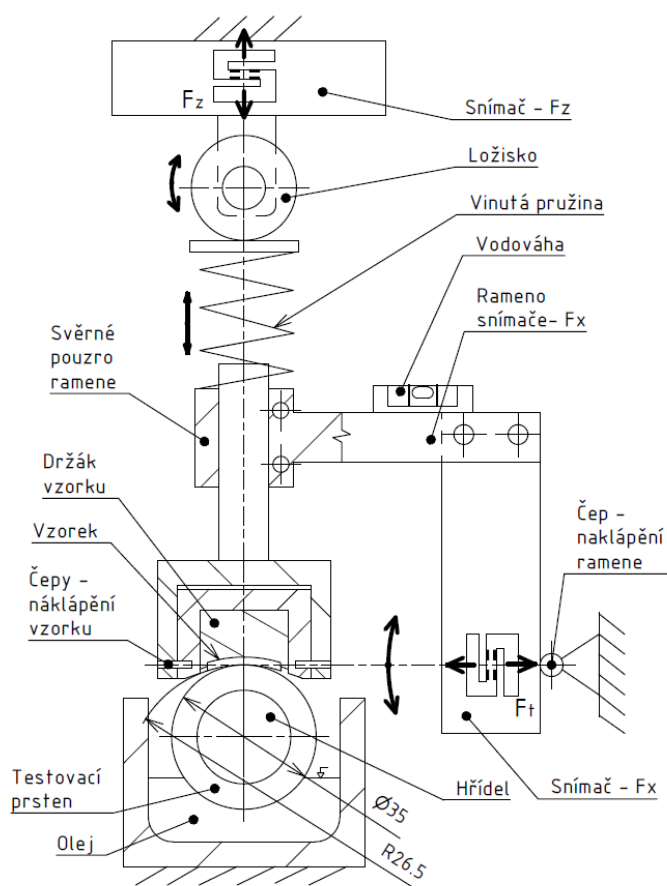
Dále je nutné ověřit funkčnost a opakovatelnost obou zařízení Bruker a Rtek. (v tvůrčí část práce nezabývá testováním na speciálním zařízení, práce pouze srovnává chování a výsledky s testy provedenými na tomto zařízení). K ověření funkčnosti a opakovatelnosti bylo provedeno několik testů za nezměněných zátěžných podmínek (pro stejný olej, teplotu prostředí, stejná délka testu, atd.) Jako vyhodnocující parametry byly použity parametry stanovující velikost opotřebení (wear rate, k), a průběh součinitele tření během testu. Pokud testy nevykazovaly velkou variabilitu výsledků, byla konfigurace uznána za vhodnou pro testování. V opačném případě bylo nutné konfiguraci konstrukčně upravit.

Na funkčních zařízeních byly následně naměřeny Stribeckovy křivky pro obě konfigurace Block-on-Ring (parametry testování vycházely z teoretické predikce). Experimentálně nalezené křivky byly srovnány se Stribeckovou křivkou ze speciálního zařízení. Na základě tohoto srovnání byla zvolena konfigurace, na které lze lépe nastavit stejné či obdobné podmínky testování jako na speciálním zařízení. Tato konfigurace byla následně vybrána pro provedení Start-Stop testů. Po provedení prvních Start-stop testů se u vzorků vyhodnotil parametr opotřebení, který byl následně srovnán s výsledky na speciálním zařízení. Pokud se výsledné opotřebení neshoduje, testy neprobíhají ve stejných režimech jako třecí kontakt na speciálním zařízení, a je nutné upravit podmínky testování, a provést celý cyklus znovu, dokud výsledky nebudou shodné.

4.2 Popis testovacích zařízení

4.2.3 Konfigurace Block-on-Ring, Rtec

Testování probíhá na konfiguraci univerzálního tribometru Rtec s konfigurací Block-on-ring (viz obr. 18), kde dochází k přitlačení vzorku na testovací kroužek. Síly jsou zaznamenávány pomocí 2 tenzometrických snímačů (snímač zatěžující síly F_z , snímač třecí síly F_t). Snímač – F_z je připojen ke svislému lineárnímu posunu, které svým pohybem přitlačí ložisko k prstenci. Jako pružný člen, který zaručuje stálý kontakt, je zde vinutá pružina. Pružinu lze měnit podle velikosti zatěžující síly (pro zatížení do 200 N je vhodné použít pružinu o velikosti 9,5 N/mm). Pružina je stlačena vnějším kroužkem ložiska, které je pomocí vidlice a lícovaného šroubu přiděláno ke snímači F_z a přitlačena k ramenu snímače třecí síly, ve kterém je pomocí svěrného pouzdra uchycena stopka s držákem vzorku.



Obr. 18 Schéma konfigurace Block-on-ring – tribometr Rtec

Rameno je pomocí 2 šroubů přichyceno ke snímači třecí síly – F_t , který je rámu tribometru přidělán pomocí rotačního čepu. Pomocí vodováhy musí být před každým měřením rameno uvedeno do ideálně vodorovné polohy, aby nedocházelo ke špatnému kontaktu vzorku s prstenem, a tím i ke špatným výsledkům. Prstenec je umístěn na hřídeli, která prochází nádobou s olejem. Třecí kontakt je mazán broděním.

Postup ustavení vzorku

Na této konfiguraci byla provedena série testů pro vyrobené sady zkušebních vzorků, které primárně sloužili k nalezení správného postupu ustavení vzorku vůči hřídeli. Nejdříve bylo nutné ustavit rameno snímače do ideální vodorovné polohy. Po tomto kroku byl vzorek zatížen malou silou k neotáčejícímu kroužku a byla hledána taková poloha, kdy třecí síla se rovnala nule. Po nalezení této polohy byl kroužek roztočen na min. otáčky 10 ot/min po a proti směru hodinovým ručiček. V obou směrech byla sledována třecí síla, která musela být stejná na obě strany otáčení. V opačném případě bylo nutné posouvat s pozicí prstence tak dlouho, dokud třecí síly nebyly na obě dvě strany stejné.

I přes pečlivé ustavování vzorku nebyly výsledky validní (viz Kapitola 5) a docházelo ke značnému rozdílu ve velikosti třecí síly a míry opotřebení pro vzorky se stejným materiálem. Opakovatelnost u této konfigurace není zaručena a není vhodná pro tento typ testování. Navíc ustavování vzorku pomocí otáček hřídele není vůbec vhodné, jelikož již dochází k opotřebení ložiska před samotným testem. Po provedení několika testů bylo stanoveno několik příčin uvedených níže, které způsobují špatné výsledky testování. Jedná se o příčiny:

- Rameno se senzorem třecí síly je připevněno k rámu tribometru pomocí čepu, tudíž koná pohyb po kružnici a se zvětšujícím se zatížením rameno ztrácí vodorovnou polohu,
- Ustavení ramene pomocí vodní váhy je velmi nepřesné a není vhodné pro tuto aplikaci,
- Šroubovitá tlačná pružina ovlivňuje díky svým výrobním nepřesnostem velikost zatěžující síly, kterou tribometr vyvíjí k přitlačení ložiska ke kroužku,

Návrh nového uchycení vzorku

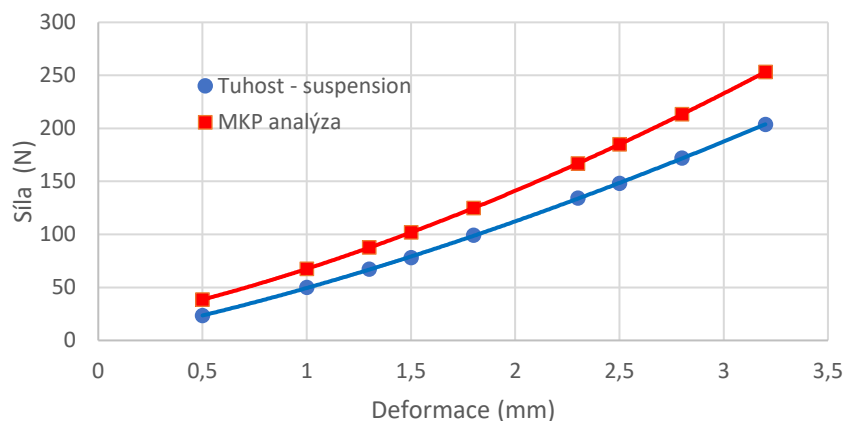
Na základě zjištěných informací je nutné konfiguraci Block-on-Ring předělat. V současně probíhající diplomové práci byl přidán senzor třecího momentu o měřím rozsahu 0 - 1 Nm na hřídel testovacího prstence. Aby bylo možné využívat tento snímač pro měření tření pro kontakt kov na kov, je nutné pojistit tento snímač pomocí třecí pojistné spojky. Třecí pojistná spojka byla umístěna na hřídel elektromotoru a ke spojce byly připojeny nově vyrobené řemenice.

Další příčiny nepřesného měření by měly být odstraněny pomocí následujícími konstrukčními variantami. Bylo vytvořeno několik konstrukčních variant, avšak následující varianta byla vybrána jako nejvhodnější pro danou operaci.

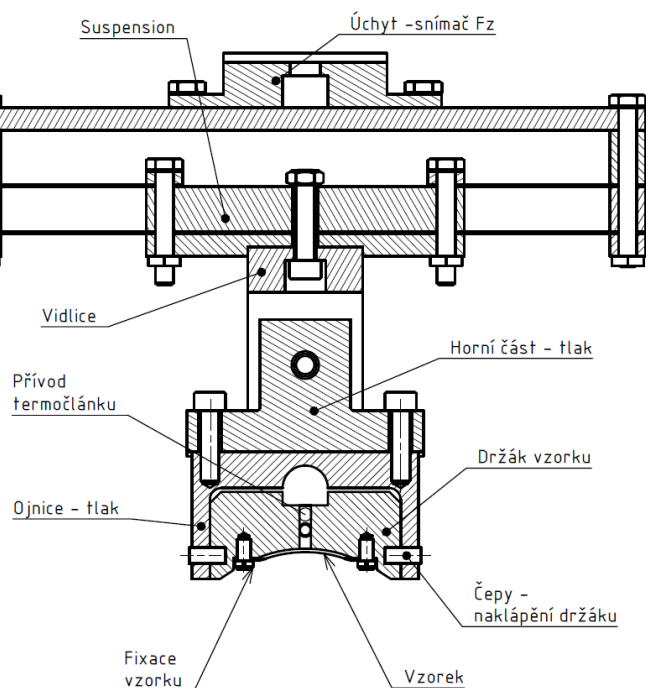
Šroubovitá pružina byla nahrazena tzv. závěsem (suspension), který je tvořen 2 tenkými plechy. Tuto součást využívá také Bruker, avšak není kompatibilní pro konkurenční Rtec, a proto muselo dojít k návrhu vlastního závěsu. Lze kombinovat plechy s různou tloušťkou (tloušťky plechů: 0,2; 0,3, 0,5), a tím měnit tuhost celého suspensionu. Ve výpočtovém softwaru Ansys Workbench byla provedena analýza sloužící k výpočtu tuhosti závěsu. Na obr. 9 lze vidět srovnání MKP analýzy se skutečností. Křivky se od sebe liší v intervalu od 10 do 15 %. Tuhost plechů s tloušťkou 0,3 a 0,5 mm se mění v intervalu od 46 po 58 N/mm. Minimální tuhost systému byla naměřena 10 N/mm a maximální 123 N/mm. Jsme tedy schopni

dosáhnout stejné tuhosti jako u šroubovitě pružina, a suspension odstranil problémy s výrobními nepřesnostmi pružiny, které ovlivňovali velikost zátěžné síly.

Nová varianta je konstruována pro nový držák vzorku. Velikost vzorku je větší, a jeho poloha je fixně zajištěna 2 malými, ale tuhými plíšky, které jsou do držáku přichyceny pomocí šroubů M3 s malou hlavou. (Obr. 20)

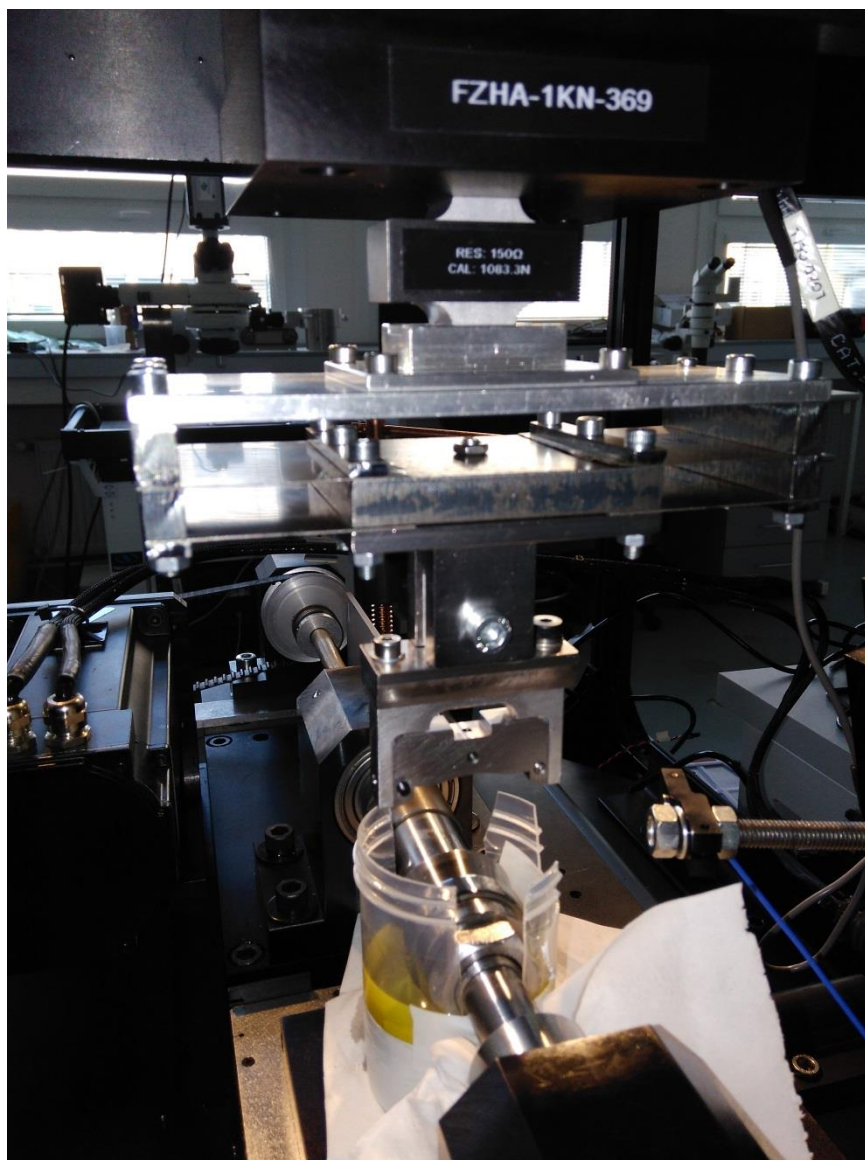


Obr. 19 Srovnání mkp analýzy se skutečnou tuhostí plechů suspensionu.



Obr. 20 Schéma konstrukční úpravy uchycení vzorku.

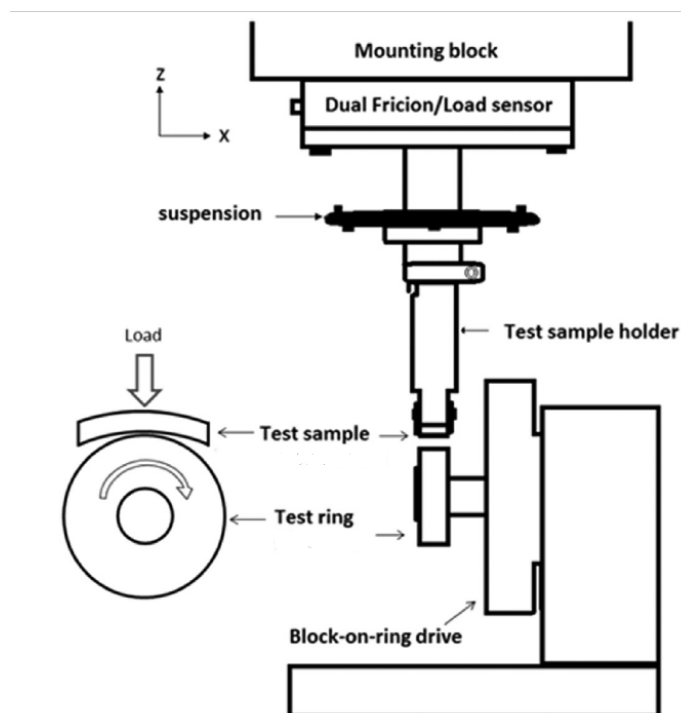
Držák vzorku se může naklápět pomocí 2 čepů v příčném směru. Vzorek je tedy přímo přitlačěn k testovacímu prstenci. Výhoda této konfigurace je ta, že vzorek je oproti stávající Rtec konfiguraci s ramenem stále ve svislé přímé poloze a nedochází k jeho naklopení. Ustavení vzorku vůči hřídeli lze provést pomocí senzoru třecí síly. Konstrukční úprava je zobrazena na obr. 21.



Obr. 21 Nové uchycení vzorku - Rtec

4.2.3 Zařízení s konfigurací Block-on-Ring , Bruker

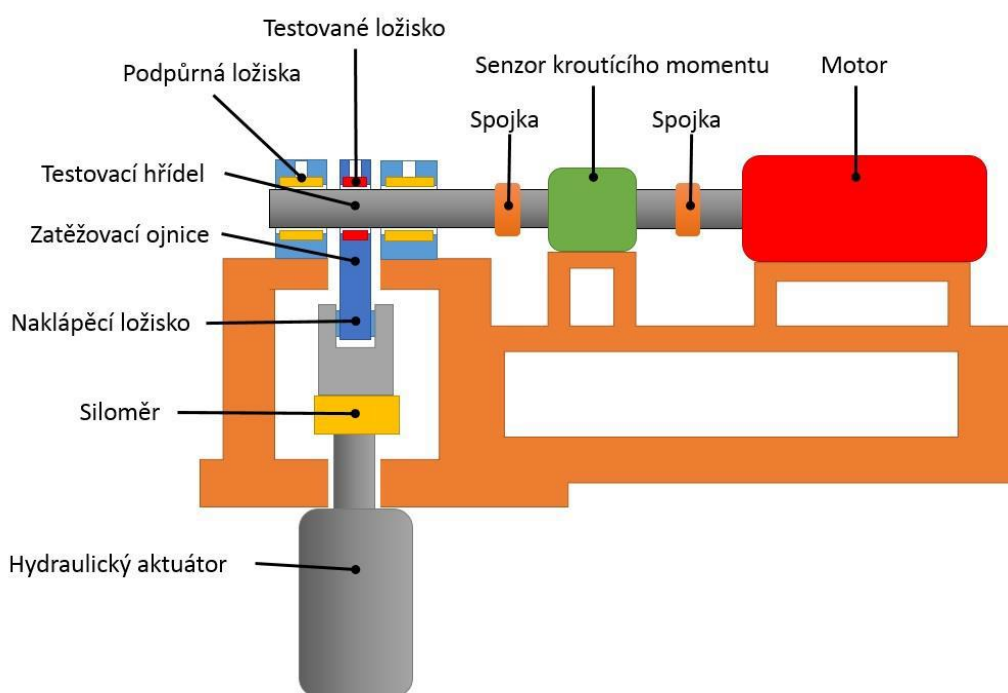
Testování probíhá na konfiguraci univerzálního tribometru Bruker s konfigurací Block-on-ring (viz obr. 22). Tribometr Bruker využívá k měření zátěžné a třecí síly tzv. Dual senzor, který je umístěn nad již zmíněný závěsem (suspension). Pro nekonformní kontakt se však používá tzv. SLB senzor, který je umístěn přímo v ose kontaktu. Oproti Rtec má Bruker velkou nevýhodu v tom, že nelze posouvat se vzorkem vůči testovacímu kroužku v tečném směru, jelikož pouze vzorku je dána konstrukcí snímače SLB.



Obr. 22 Schéma zařízení Bruker s konfigurací Block-on-Ring [10]

4.2.3 Zařízení pro testování ložisek

Zařízení popisované v této kapitole slouží k testování kluzných parciálních ložisek spalovacích motorů. Zařízení (obr. 23) je schopno vyvodit extrémní zatížení pro urychlení testování, avšak přípravy před provedením každého testu jsou zdlouhavé. Tření je měřeno na hřídeli pomocí senzoru kroutícího momentu.

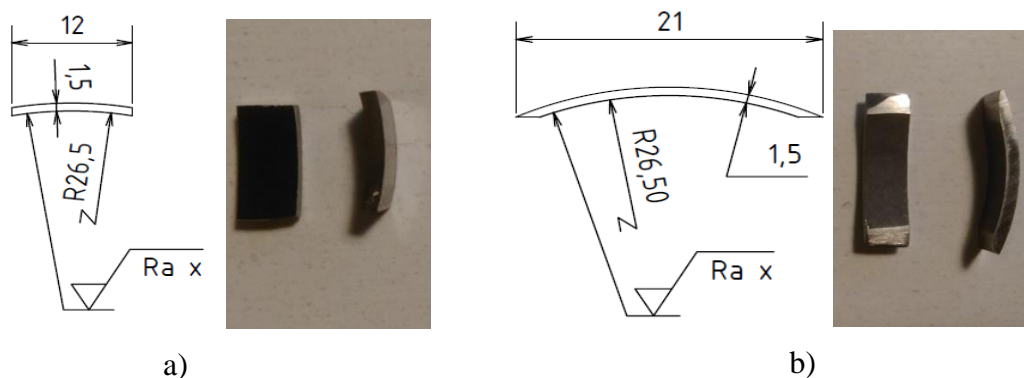


Obr. 23 Zařízení sloužící k testování kluzných ložisek spalovacích motorů [9]

4.3 Materiály

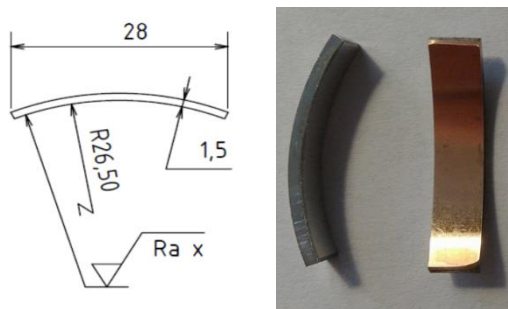
4.3.1 Vzorek ložisek

Testovací vzorek je vyráběn z ojnicního parciálního ložiska o průměru 53 mm a tloušťky 1,5 mm. Vzorek je rozřezán na přesnou šířku 5 mm. Tato pánev je dále rozřezána na vzorky o cca 0,2 mm větší. Vzorky jsou následně pomocí leštičky vyleštěny na požadovanou délku dle obr. 24.



Obr. 24 a) testovací vzorek pro nekonformní konfiguraci Block-on-Ring,- Bruker b) Testovací vzorek pro nekonformní konfiguraci Block-on-Ring. - Rtek

Konfigurace „Block on ring“ s konformním kontaktem využívá jinou velikost vzorku než u nekonformní varianty. Délka vzorku (obr. 25) je 28 mm a šířka vzorku je 5 mm. Tuto velikost lze použít pouze na Start-Stop test, u kterého jsme schopni dosáhnout rovnocenných tlaků jako na speciálním zařízení.



Obr. 25 Testovací vzorek pro konformní kontakt.

U přípravy vzorků je velmi důležité chránit jejich povrch, jelikož poškození povrchu by zvýšil jeho drsnost, nebo odstranit část povlaku ze vzorku v testovaném místě. Tím by se stal nevhodný pro testování. Drsnosti jednotlivých materiálů a tloušťky jednotlivých vrstev jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Naměřená drsnost jednotlivých materiálů ložisek

Materiál povrchu	Drsnost Ra (μm)	Drsnost Rq (μm)
Hliníková slitina	0,26	0,36
Bronzová slitina	0,4	0,63
Bismut + Stříbro	0,68	0,89

4.4.3 Testovací kroužek

Testovací kroužek pro nekomfortní kontakt je vnější kroužek ložiska TIMKEN s označením A4138. Testovaný průměr je 35 mm. Drsnost kontaktního povrchu byla naměřena hodnota: R_a 0,11 μm , R_q 0,3. Jelikož jsou tyto kroužky komerčně dostupné, je důležité, kontrolovat geometrické tolerance na nových vzorcích. Jedná se především o tolerance celkového obvodového házení vůči součásti s vnějším kuzelem, na které je testovací kroužek nasazen. Aby výsledky testování byly validní, je nutné, aby kroužek měl válcovitost menší jak 0,01 mm.

Pro konformní kontakt byl testovací kroužek vyroben na zakázku. Kroužek má průměr 53 mm. Drsnost R_a povrchu před testem musí být v intervalu 0,07 až 0,11, aby byl test úspěšný. Kroužek má válcovitost 0,005 mm.

4.4.4 Mazivo

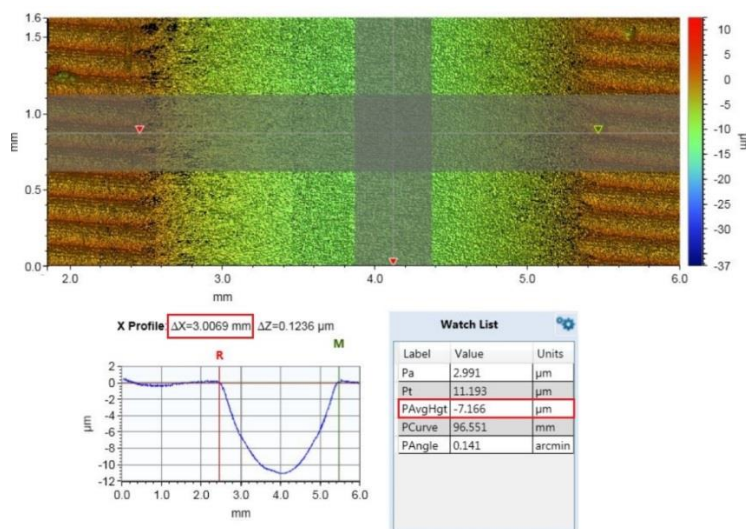
Mazání třecího kontaktu probíhá broděním testovacího kroužku v nízko-viskosním oleji s označením Renolin DTA05. Tento olej se používá pro mazání ložisek a převodů strojů s nízkým namáháním. Olej neobsahuje žádné aditiva, které by ovlivňovaly výsledek měření.

4.5 Hodnocení množství opotřebeného materiálu

4.5.1 Optická profilometrie

Jednotlivé opotřebení lze porovnávat dle velikosti opotřebeného objemu, který se dá získat mapováním opotřebeného povrchu pomocí 3D optického profilometru Bruker ContourGT-X. Z naskenovaného povrchu určíme hloubku (P_{AvrHgt} , obr. 26) a šířku (ΔZ , obr. 26) Získané hodnoty dosadím do vzorce pro výpočet objemu (vztah 4.5), kde L je šířka vzorku.

$$V = P_{AvrHgt} \cdot \Delta X \cdot L \text{ (mm}^3\text{)} \quad (4.5)$$

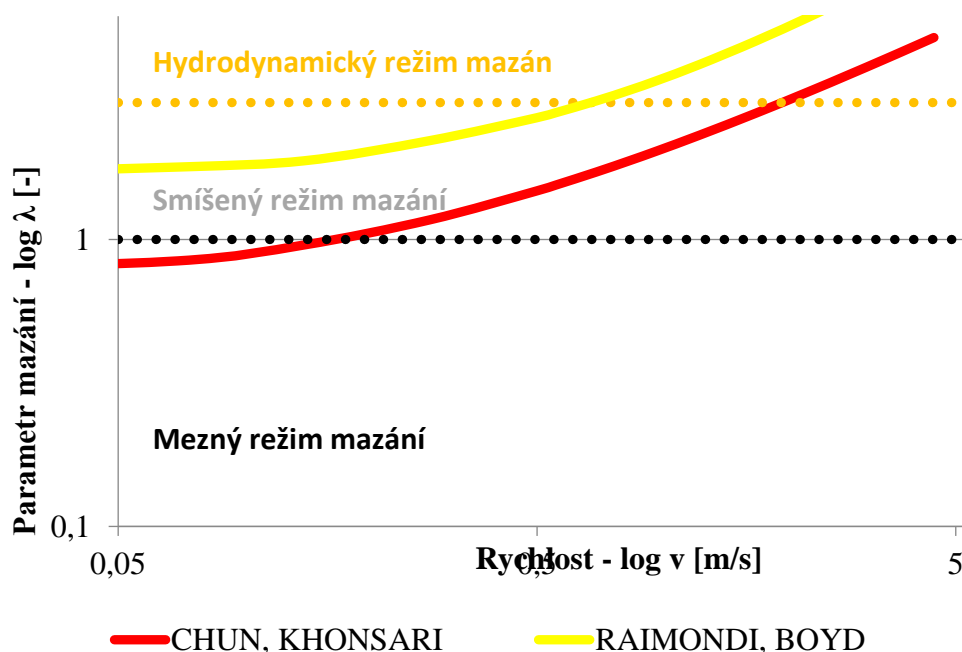


Obr. 26 Měření vzorku na profilometru.

5 VÝSLEDKY

5.1 Teoretická predikce chování jednotlivých úrovní testování

Predikce chování jednotlivých úrovní testování byla provedena podle 3 metod výpočtu tloušťky mazacího filmu uvedených v kap. 2.3. Všechny 3 teorie výpočtu jsou porovnány na obr. 27, ze kterého vyplívá, že teorie dle Raimondi, Boyd není vhodná pro výpočet minimální tloušťky mazacího filmu ve smíšeném a mezném režimu mazání, jelikož i pro velmi malé rychlosti nezasahuje její křivka do mezného režimu mazání, ke kterému určitě dochází během cyklu Start-Stop.



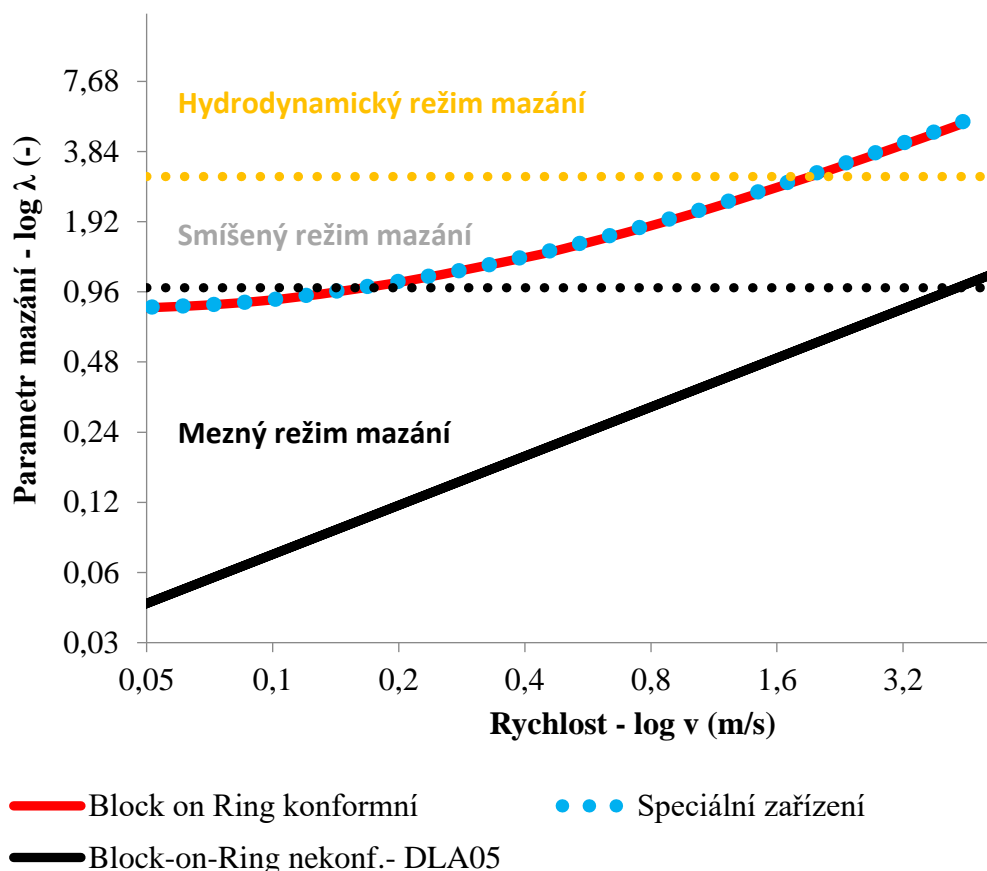
Obr. 27 Srovnání jednotlivých teorií výpočtu minimální tloušťky mazacího filmu pro konformní kontakt Block-on-Ring.

Vhodnější teorie je podle autorů *Chun, Khonsari* [18], jejichž křivka zasahuje do oblasti mezného mazání. Při srovnání obou křivek lze si povšimnout, že mají excentrický tvar. Tento tvar je u zvolené teorie způsoben druhým členem rovnice (2.19), který zahrnuje do výpočtu také drsnost a tvrdost materiálu. Teorie dle *Dowson a Higgins* [12] pro iso-viskozni elastický režim je určena k výpočtu minimální tloušťky mazacího filmu nekonformního liniového kontaktu.

Výpočty jsou prováděny pro konstantní kontaktní tlak 15,5 MPa a viskozitu oleje DLA05 6,8 mPas. Obr. 28 znázorňuje srovnání tribologického chování jednotlivých konfigurací. Konformní kontakty mají stejný průběh závislosti parametru mazání na rychlosti. Přejít mezi mezným a smíšeným režimem probíhá při rychlosti 0,15 m/s (60 ot./min). Přejít mezi smíšeným a hydrodynamickým režimem probíhá při 1,66 m/s (600 ot./min).

Nekonformní kontakt mazaný má přechod mezi smíšeným a mezným mazáním při rychlosti 3,5 m/s (1800 ot/min) a přechod mezi smíšeným/HD režimem nastává při rychlostech až 10 m/s. Tak vysoké rychlosti nelze nastavit na univerzálních

tribometrech, tudíž není vhodné provádět Start-stop test za daných podmínek na nekonformní variantě.



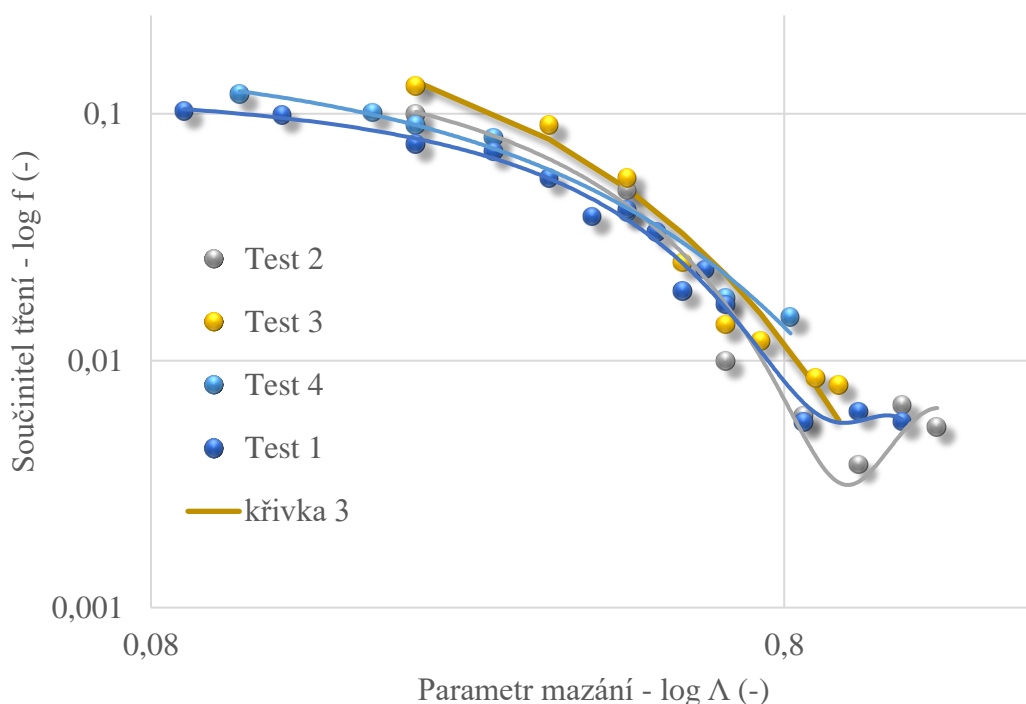
Obr. 28 Srovnání tribologického chování jednotlivých konfigurací.

5.2 Experimentální výsledky - nekonformní kontakt

5.2.1 Test k určení Stribeckovy křivky – Rtek

Testy slouží ke stanovení Stribeckovy křivky slouží k určení chování nekonformního kontaktu. Všechny testy probíhaly za konstantního kontaktního tlaku 15,5 MPa, a během testu skokově klesala rychlost otáčení hřídele od 4 m/s po 0,03 m/s. Délka jednoho kroku byla nastavena na 15 sekund. Celkem byly provedeny čtyři testy. Každý test byl proveden na novém nepoužitém vzorku. Všechny testy probíhaly na konfiguraci Rtek (bez konstrukčních úprav) za pokojové teploty s nízkoviskózním olejem DTA05 (dynamická viskozita – 6,8 mPas).

Maximální procentuální rozdíl křivek se v celém průběhu pohyboval v intervalu 5 až 12 %. Z obr. 28 je patrné, že měření Stribeckových křivek probíhalo podle parametru λ skoro celé v mezním režimu mazání. Přechod mezi mezním a smíšeným režimem mazání nastává při rychlosti přibližně při rychlosti 1,8 m/s.



Obr. 29 Měření Stribeckovy křivky - Rtek

5.2.2 Test opakovatelnosti – Rtec

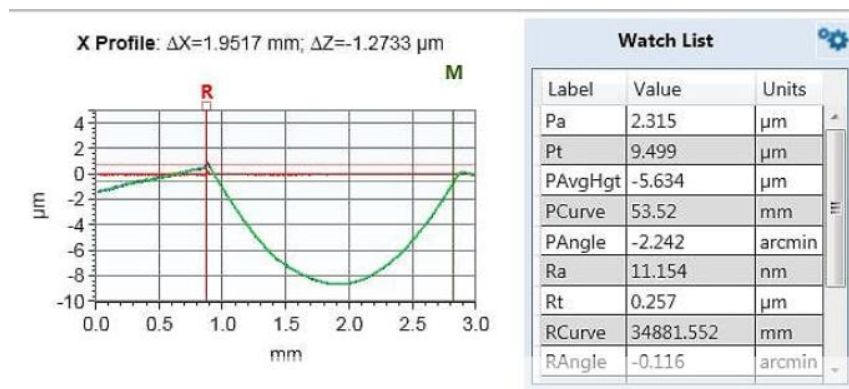
Testování funkčnosti zařízení nám slouží k ověření opakovatelnosti výsledků. Na základě toho je možné stanovit chybu (nepřesnost) zařízení, s jakou je tato konfigurace schopna pracovat. Testy byly prováděny na vzorcích s hliníkovou slitinou, bez žádného povlaku. Pro každý test byl použit nový vzorek.

Testy probíhaly za konstantního kontaktního tlaku 15,5 MPa, konstantní rychlosti 0,183 m/s. a testovací čas byl 10 minut. Jako porovnávací kritérium pro testy bylo použito velikost opotřebení a byl také srovnáván průběh koeficientu opotřebení.

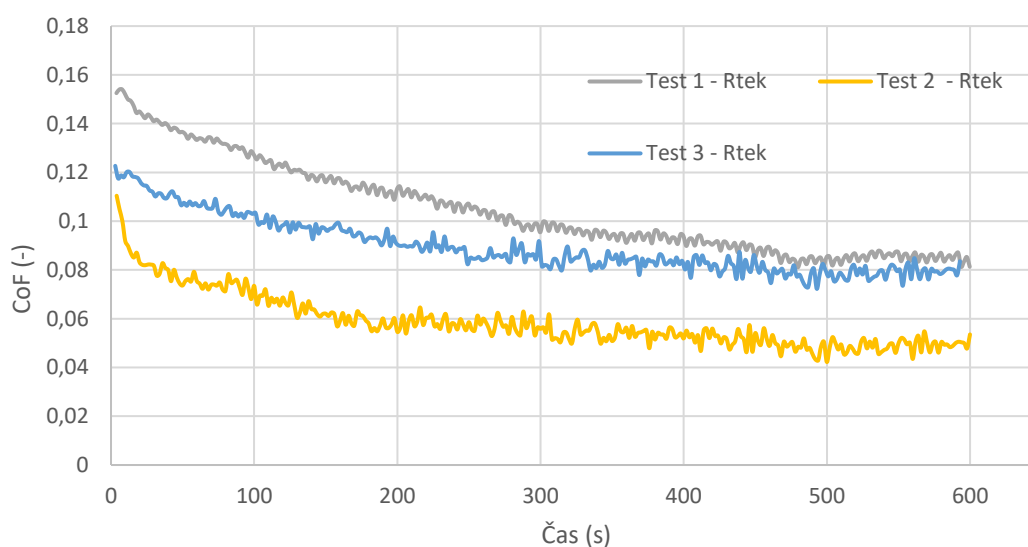
V tabulce č. 2 můžete vidět naměřenou šířku a hloubku opotřebení pro jednotlivé testy. Velikost opotřebení se lišila pro jednotlivé testy lišilo o 26,6 procent, což pro nekonformní liniový kontakt, který se teoreticky dotýká pouze v 1 linii je hodně velký rozdíl. Šířka opotřeбенé oblasti se pohybuje od 1 po 3 mm. Hloubka opotřeбенé oblasti je v jednotkách mikronů (viz tab. 2 a obr. 30).

Tab. 2 Opotřebení rtec - před úpravou

TEST	P_{AvrHgt} [mm]	X [mm]	V [mm ³]	W [10 ⁻⁵ mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹]
Test 1 - Rtec	0,00367	2,97	0,054	0,660
Test 2 - Rtec	0,00202	3,12	0,032	0,383
Test 3 - Rtec	0,00568	1,95	0,048	0,566
ROZDÍL [%]				26,6



Obr. 30 Tvar a velikost opotřeбенé oblasti vzorku.



Obr. 31 Srovnání součinitele tření pro testy opakovatelnosti – Rtec

Tab. 3 Srovnání součinitele tření – Rtec – před úpravou

t[s]	50	150	250	350	450	550
Testy	Součinitel tření - f(-)					
Test 1 - Rtek	0,135	0,116	0,1	0,093	0,083	0,0825
Test 2 - Rtek	0,073	0,061	0,056	0,053	0,048	0,05
Test 3 - Rtek	0,11	0,096	0,085	0,084	0,079	0,08
PRŮMĚR	0,10225	0,08825	0,078125	0,075125	0,07025	0,070625
Variační koef. [%]	29,8	31,1	28,2	27,4	26,7	24,5

Z výsledných hodnot tření lze vidět, že mezi jednotlivými testy vzniká velmi vysoký procentuální rozdíl. Nekonformní konfigurace Block-on-Ring je určena pro měření koeficientu tření pro jednotlivé materiály, které mohou mít rozdíly v součiniteli tření řádově v jednotkách procent, viz výsledky ve zdroji [10]. A tento rozdíl nelze naměřit pomocí senzoru třecí síly na zařízení Rtec, pokud rozdíly v součiniteli tření mezi jednotlivými testy se stejným nastavením se pohybují okolo 30 %.

5.2.3 Test opakovatelnosti – Rtec + konstrukční úpravy

Na základě nevalidních výsledků opotřebení byly provedeny konstrukční úpravy popsané v kap. 4.2.3. Na této konfiguraci byly provedeny stejné testy jako v předchozí kapitole, aby bylo možné porovnat rozdíly.

U opotřebované oblasti došlo k výraznému zmenšení kontaktní oblasti. Hloubka opotřebované oblasti se pohybovala v desetinách mikrometru (průměrná hodnota 0,432 μm). Šířka opotřebované oblasti byla menší než 1 mm. A variační koeficient je roven 8,8 %. Zde uvedené výsledky byly zapříčiněny především pevným uchycením vzorku v holder, jelikož u předchozí varianty byl vzorek o velikosti 12x5 mm pouze nacvaknut ve svém holderu a nebyla zaručena jeho fixní poloha. Parametr wear rate se řádově pohybuje v hodnotách 10^{-7} . I když došlo ke snížení tohoto parametru o 1 řád, stále ho nelze srovnávat s opotřebením na celých ložiscích, kde se tento parametr pohybuje řádově v hodnotách 10^{-10} .

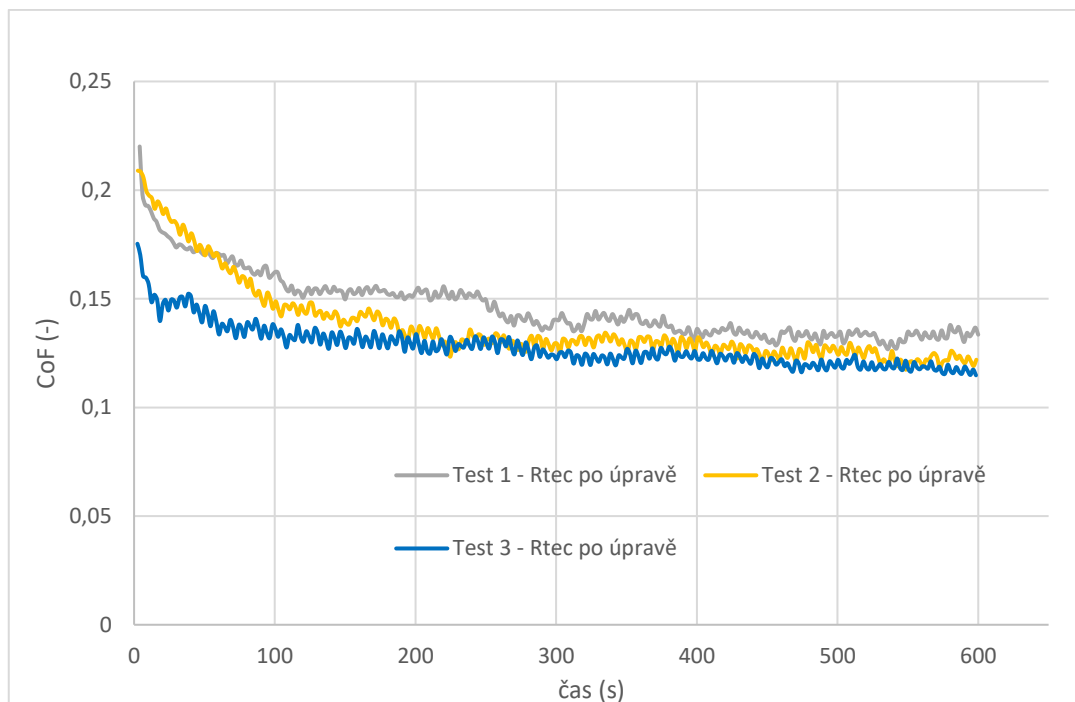
Součinitel tření byl už nyní měřen pomocí senzoru třecího momentu. Jeho hodnota se pohybovala s variabilitou s odchylkou 10 %. Senzor třecího momentu však není vhodný pro testování Start-Stop metodiky, jelikož jeho rozsah je malý a při okamžité změně zatížení nebo otáček docházelo k velkému nárůstu třecího momentu, a došlo k rozpojení třecí pojistné spojky. Tento problém nastal i při měření Stribeckové křivky. Pro tyto typy testů by bylo nutné pořídit senzor s větším rozsahem.

Tab. 4 Srovnání opotřebení Rtec - po úpravě

TEST	P_{AvrHgt} [mm]	ΔX [mm]	V [mm ³]	W [10 ⁻⁵ mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹]
Test 1	0,000441	0,92	0,00203	0,025
Test 2	0,000423	0,83	0,00176	0,021
Test 3	0,000434	0,84	0,00182	0,022
Variační koef. [%]	8,8			

Tab. 5 Srovnání součinitele tření pro testy opakovatelnosti – Rtec po úpravě

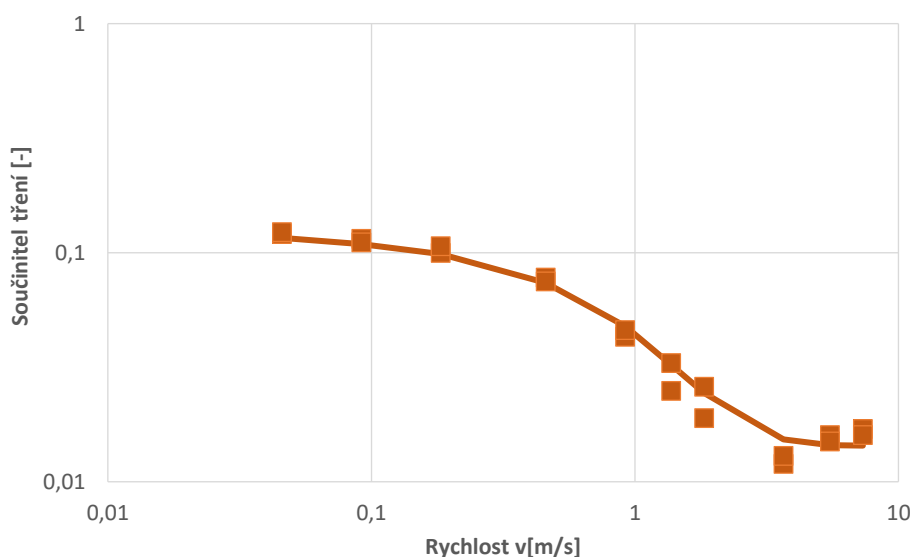
t[s]	50	150	250	350	450	550
Testy	Součinitel tření - f(-)					
Test 1 - Rtek	0,17	0,155	0,15	0,125	0,123	0,131
Test 2 - Rtek	0,17	0,136	0,126	0,122	0,125	0,12
Test 3 - Rtek	0,14	0,133	0,132	0,123	0,12	0,12
Variační koef. [%]	8,7	9	8,4	7	2	4



Obr. 32 Srovnání opotřebení jednotlivých testů - rtec po úpravě.

5.2.4 Test k určení Stribeckovy křivky – Bruker

Testy slouží ke stanovení Stribeckovy křivky sloužící k určení chování nekonformního kontaktu na zařízení Bruker. Testy probíhaly za stejných podmínek jako na zařízení Rtec. Celkem byly provedeny dva testy na dvou různých vzorcích.



Obr. 33 Stribeckova křivka - Bruker

Body z testů byly proloženy 1 křivkou. Křivka je dále srovnávána se Stribeckovou křivkou z nekonformní konfigurací Rtec.

5.2.5 Test opakovatelnosti – Bruker

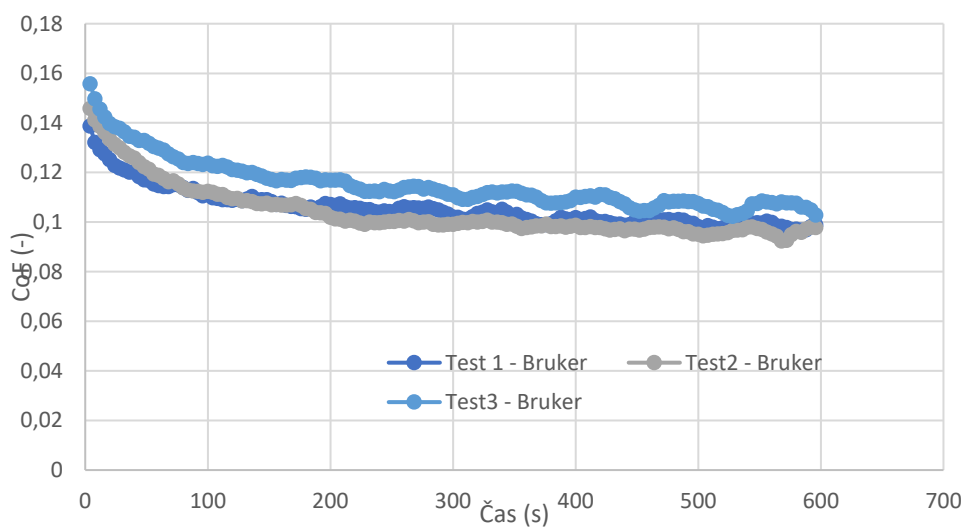
Testování funkčnosti zařízení nám slouží k ověření opakovatelnosti výsledků. Na základě toho je možné stanovit chybu (nepřesnost) zařízení, s jakou je tato konfigurace schopna pracovat. Testy byly prováděny na vzorcích s hliníkovou slitinou, bez žádného povlaku. Pro každý test byl použit nový vzorek.

Testy probíhaly za konstantního kontaktního tlaku 15,5 MPa, konstantní rychlosti 0,183 m/s. a testovací čas byl 10 minut. Jako porovnávací kritérium pro testy bylo použito velikost opotřebení a byl také srovnáván průběh koeficientu opotřebení.

V tabulce č. 6 můžete vidět naměřenou šířku a hloubku opotřebení pro jednotlivé testy. Velikost opotřebení se lišila pro jednotlivé testy lišilo o 15,2 procent.

Tab. 6 Opotřebení - Bruker

TEST	P_{AvrHgt} [mm]	ΔX [mm]	V [mm ³]	W [10 ⁻⁵ mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹]
Test 1	0,00193	1,856	0,018	0,43
Test 2	0,00154	1,713	0,013	0,32
Test 3	0,00145	2,124	0,015	0,37
ROZDÍL [%]				15,2

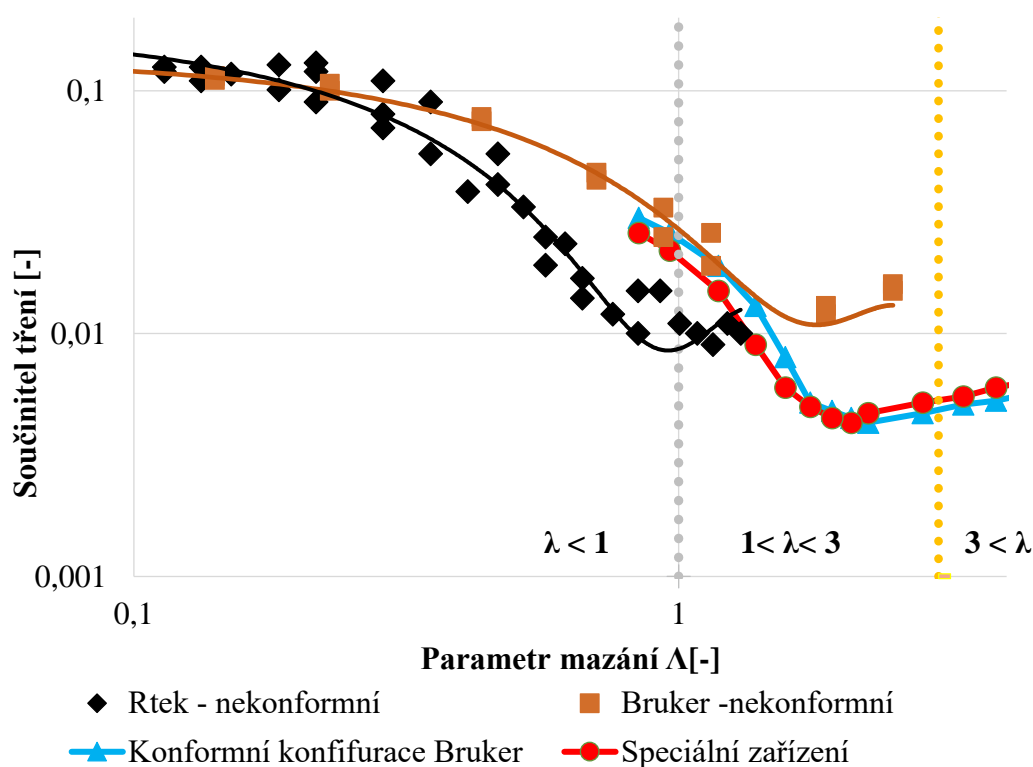


Obr. 34 Koeficient tření - Bruker

5.3 Experimentální výsledky - konformní kontakt

Tato konfigurace byla použita ke srovnání tribologického chování konformní konfigurace Block-on-Ring zařízení Bruker a speciálního zařízení. Cílem této kapitoly je zjistit, zda jsme schopni experimentálně nastavit obdobné podmínky testování na obou zařízeních na základě součinitele tření, a následně zjištění potvrdit na základě koeficientu opotřebení k . Uvedené srovnání je prováděno pro jeden základní materiál (hliníková slitina). Za stanovených podmínek budou následně provedeny Start-stop testy pro více materiálů a výsledné hodnoty opotřebení budou srovnány s testy provedenými na specializovaném zařízení.

5.3.1 Porovnání Stribeckovy křivky – Rtek, Bruker (konf., nekonf.) Speciální zařízení



Obr. 35 Srovnání Stribeckových křivek všech konfigurací.

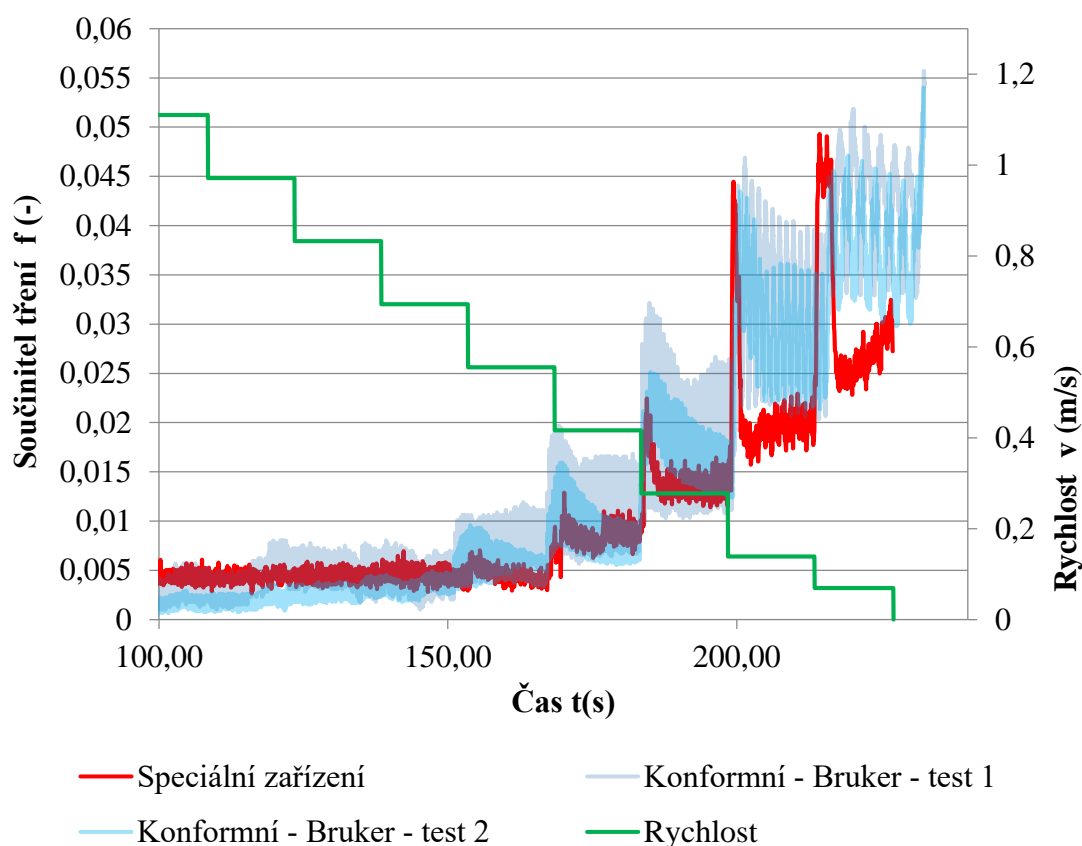
Na obr. 35 jsou zobrazeny Stribeckovy křivky pro Speciální zařízení, nekonformní konfigurace Bruker, nekonformní konfiguraci Rtek a konformní konfiguraci Bruker. Průběh testu probíhal za konstantního kontaktního tlaku 15,5 MPa. Rychlost hřídele skokově klesala od 5 m/s do 0,07 m/s. Jeden krok trval 15 s. Testy byly provedeny pro stejný olej DLA05. Z obrázku je patrné, že chování jednotlivých typů kontaktů se výrazně liší. Křivky nekonformního kontaktu jsou výrazně posunuty do nižších hodnot parametru mazání, kde dochází k daleko vyššímu součiniteli tření.

5.3.2 Porovnání Stribeckovy křivky – Bruker, Speciální zařízení

Z teoretického srovnání jednotlivých konfigurací bylo zjištěno, že konformní kontakt má pro konkrétní parametry testování obdobné tribologické chování jako speciální zařízení. Pro nalezené parametry (tab. 6) byly na univerzálním tribometru Bruker provedeny testy na stanovení Stribeckovy křivky, které slouží jako experimentální srovnání obou zařízení. Zatížení a typ oleje byly voleny stejné jako u Start-Stop testu.

Tab. 7 Parametry testování - Bruker - konformní varianta

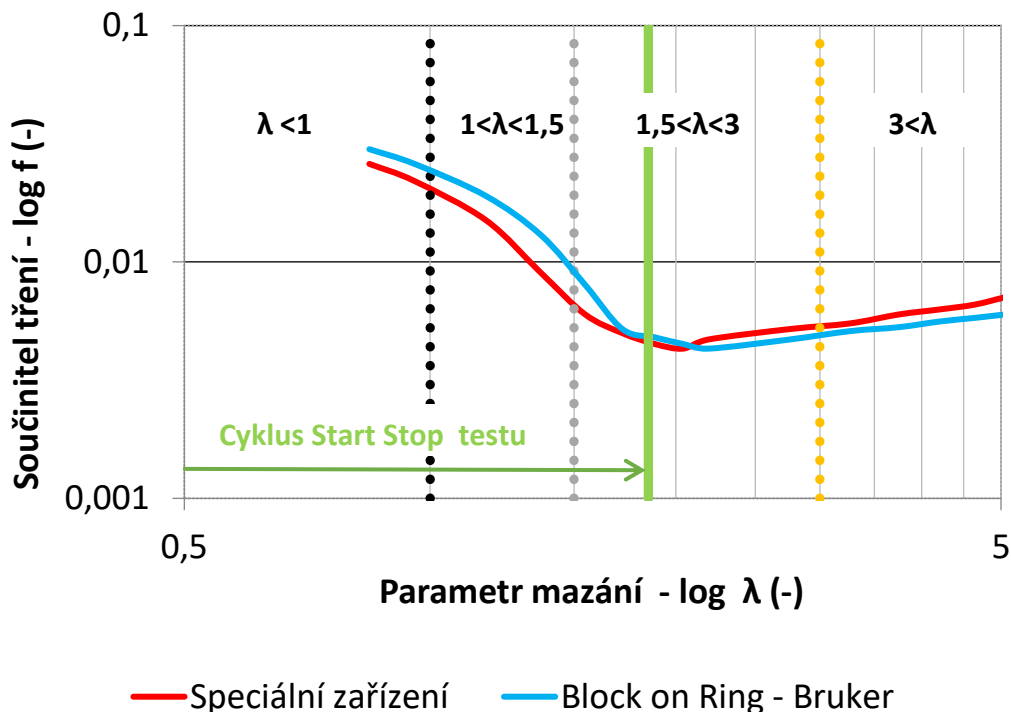
rychlost otáčení hřídele	4,5 – 0,07	m/s
délka kroku	15	s
zatížení	420	N
kontaktní tlak	15,5	Mpa
viskozita oleje	6,8	mPas
materiál ložiska	Hliníková slitina	-



Obr. 36 Naměřená data Stribeckovy křivky - Speciální zařízení, Bruker konformní.

Na obr. 36 jsou zobrazeny naměřené hodnoty součinitele tření během snižování rychlosti otáčení hřídele. Změna součinitele tření nastává pro obě konfigurace během rychlosti 0,55 m/s. Pro nižší rychlosti koeficient tření roste rychleji pro konformní konfiguraci Block on Ring.

Koeficient postupně vystoupal až na hodnotu 0,037 při rychlosti 0,07 m/s. Oproti tomu celého ložisko dosáhlo maximálního součinitele tření 0,028. Tento rozdíl je především způsobený kvalitnějším mazáním na speciálním zařízení, kde přímo do kontaktu je přiváděno mazivo pomocí otvoru v horním (nezatěžovaném) parciálním ložisku.

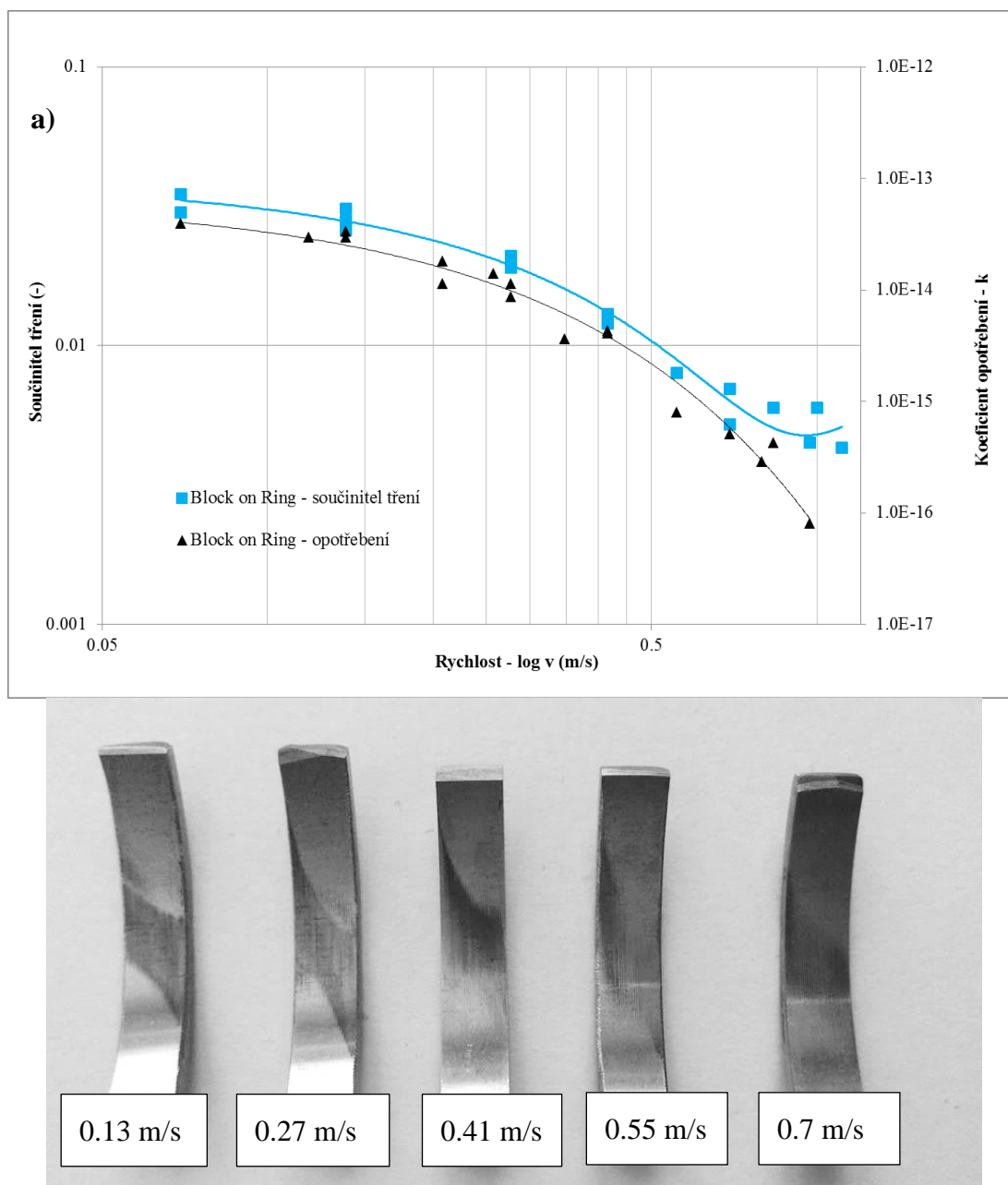


Obr. 37 Srovnání Stribeckových křivek pro Full Scale zařízení a konformní varianty Block on Ring.

Naměřené hodnoty tření byly proloženy křivkami, a zobrazeny v obr. 37, který vyjadřuje závislost naměřeného součinitele tření na parametru mazání. Křivky se od sebe lišily v intervalu od 1 do 8 %. Z grafu jsou také patrné režimy mazání, ke kterým dochází při zrychlení hřídele během Start-Stop testu. Parametr mazání λ se mění od 0 po $\lambda = 1,85$. Tato hodnota značí, že může dojít k otěru materiálu, který by však neměl měnit funkčnost povrchu. Přechod mezi mezním a smíšeným režimem mazání nastává při rychlosti 0,17 m/s. Parametr mazání $\lambda = 1,5$ je roven rychlosti 0,52 m/s. Nyní je však nutné zjistit, jak se pro uvedené rychlosti mění velikost opotřebení a zda dochází k výraznější změně chování konformního kontaktu Block-on-Ring.

5.3.3 Vyhodnocení konformního kontaktu Block on Ring + určení opakovatelnosti měření - Bruker

V této kapitole je pospáno, jak se mění koeficient opotřebení v intervalu rychlostí od 0 po 1 m/s. Bylo provedeno 16 testů s konstantním kontaktním zatížením 15,5 MPa. Jako mazivo kontaktu byl použit olej DLA05. Test probíhal za pokojové teploty, při které má uvedený olej dynamickou viskozitu 6,8 mPas. V rámci testů bylo současně sledováno, jaký je vliv délky testování na hodnocení opotřebení (bezrozměrný součinitel opotřebení je normalizovaný vůči délce testu).

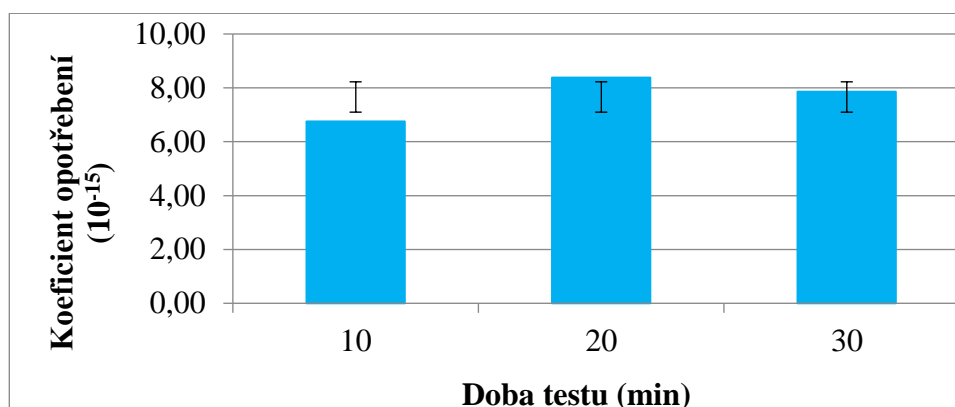


Obr. 38 a) Srovnání koeficientu tření s koeficientem opotřebení pro jednotlivé rychlosti z intervalu 0 - 1 m/s, b) Opotřebení materiálu A22E pro jednotlivé rychlosti.

Ze závislosti opotřebení na rychlosti (obr. 38a) lze vidět, že s rostoucím parametrem mazání (rostoucí rychlostí) koeficient opotřebení exponenciálně klesá, podobně jako u součinitele tření. Tabulka č. 7 popisuje výsledné veličiny jednotlivých testů, ze kterých byly sestrojeny křivky opotřebení a tření ve výše uvedeném grafu. Z tabulky je patrné, že na koeficient opotřebení nemá vliv délka testu. Tento fakt potvrzuje sloupcový graf na obr. 37, kde jsou srovnány 3 testy s různou délkou testu, a aritmetický průměr koeficientu tření z těchto testů má hodnotu 7,66 se směrodatnou odchylkou $\pm 0,679$. Variační koeficient tohoto souboru dat je 8,8%, což ze statistického hlediska není velká chyba. Tím byla zjištěna opakovatelnost konformního kontaktu z hlediska opotřebení.

Tab. 8 Zprůměrované hodnoty součinitele opotřebení pro jednotlivé testy s odlišnými rychlostmi.

Rychlost v [m/s]	Parametr mazání (predikce) λ [-]	Doba testu t [min]	Hloubka opotř. d [μm]	Koeficient opotřebení k	0,52 m/s ($\Lambda = 1,5$)
0,069	0,84	10	14,1	3,93E-14	
0,139	0,96	10	11,9	3,37E-14	
0,208	1,18	20	12,5	1,82E-14	
0,278	1,38	10	8,1	7,66E-15	
0,347	1,56	20	7,6	3,64E-15	
0,416	1,74	30	8,2	4,28E-15	
0,555	1,91	20	3,3	8,03E-16	
0,694	2,07	30	1,8	5,13E-16	
0,833	0,84	40	1,3	4,25E-16	
0,971	0,96	40	1,1	8,13E-17	

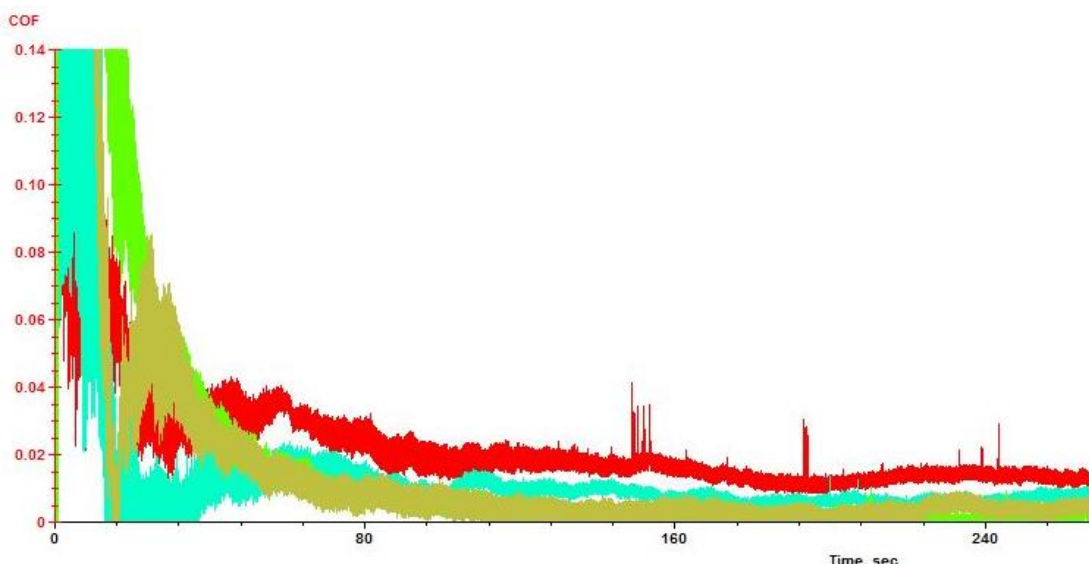


Obr. 39 Koeficient opotřebení v závislosti na různé době testu pro testovací podmínky: 420N, 0,28 m/s a stejný materiál (Hliníková slitina).

V tabulce je vyznačena také rychlost 0,52 m/s ($\lambda = 1,5$), která byla odvozena v předešlé kapitole pro přechod mezi jednotlivými režimy opotřebení (viz kap. 2.3.3). Tato hranice značí, že mezi rychlostmi 0,42 a 0,55 m/s došlo k výraznému poklesu hodnoty koeficientu opotřebení (procentuální rozdíl mezi hodnotami 68%). Tudíž přibližně kolem rychlosti 0,52 m/s skutečně nastává přechod mezi jednotlivými režimy opotřebení stanovenými okrajovými podmínkami parametru λ , jelikož při vyšších rychlostech koeficient opotřebení tak výrazně neklesá (max. o 20 %). Při těchto rychlostech docházelo k hloubce opotřebované oblasti 1 – 2 μm , i když test trval 30 minut a déle. Došlo tedy k pouhému ořezu ložiska, který nemění vlastnosti chování ložisek [3]. Přechod mezi mezním a smíšeným režimem mazáním byl stanoven pro rychlost 0,17 m/s. Tato hodnota se nachází v intervalu rychlostí 0,14 až 0,21 m/s, kdy došlo k poklesu koeficientu opotřebení o 30%. K většímu poklesu koeficientu však došlo v intervalu 0,21 až 0,28 m/s. (až o 40 %), což značí, že přechod mezi těmito režimy by měl dojít v tomto intervalu. Nicméně rozdíl 10 % může být způsoben

chybou měření, tudíž zde je těžké přesně určit, kdy přesně došlo ke změně režimů mazání.

U těchto typů testů byla sledována také opakovatelnost měření třecí síly. Na obr. 40 můžete vidět závislost součinitele tření na průběhu testu. V časovém intervalu od 0 po 80 s docházelo k záběhu nerovností ložiska. Červená křivka vykazuje vyšší hodnoty součinitele tření, jelikož test byl proveden za konstantních otáček nižších než u ostatních testů, jejichž procentuální odchylka je kromě záběhu vzorku max. 10 %.



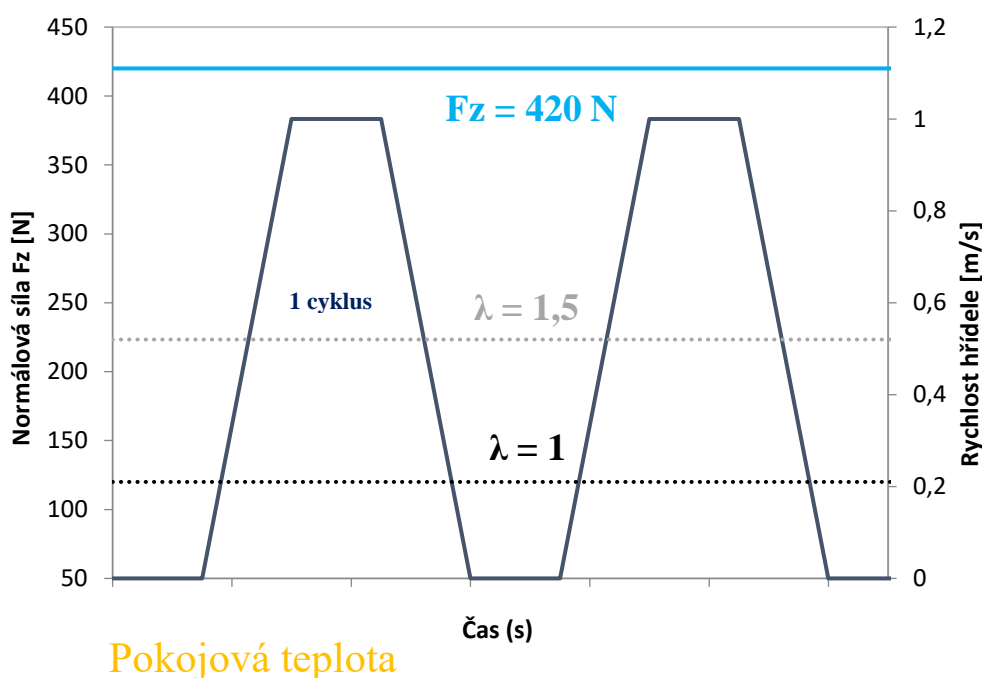
Obr. 40 Závislost součinitele tření pro testy s konstantním zatížením, a pro jednotlivé rychlosti (červená - 0,27 m/s, azurová/hnědá/zelená = 0,55 m/s).

5.3.4 Start-stop test – Bruker, Speciální zařízení

Tato kapitola se již zabývá srovnáním materiálů hliníková slitiny, bronzové slitiny a slitiny Bismutu se Stříbrem na základě velikosti koeficientu opotřebení k . Průběh (viz obr. 41) a čas zrychlení a zpomalení 1 cyklu byly stanoveny stejné jako u speciálního zařízení, aby nedošlo k ovlivnění výsledků opotřebení díky rychlejšímu nebo pomalejšímu přechodu z jednotlivých režimů mazání. Testy byly prováděny pro 200, 500 a 800 cyklů opakování. Výsledky opotřebení Start-stop testů s 200 cykly nebyly srovnatelné pro jednotlivé materiály, jelikož během tak krátkého testu docházelo většinou k pouhému zarovnání nerovností.

Tab. 9 Parametry testování -Start-Stop test- Bruker

rychlost otáčení hřídele	0 - 1	m/s
zatížení	420	N
kontaktní tlak	15,5	Mpa
viskozita oleje	6,8	mPas
teplota prostředí	25	°C
doba testu	200/500/800	cyklů



Obr. 41 Průběh Start-stop testu.

Před samotným testováním bylo provedeno ověření, zda je vhodně zvolené zatížení testu 420 N (to odpovídá kontaktnímu tlaku 15,5 MPa).. Byly provedeny 3 série testů pro kontaktní tlak 10,1 MPa, 420 15,5 MPa a 19,9 MPa. Délka testu byla nastavena na 500 opakování. Testy byly provedeny pro bronzovou slitinu a výsledné hodnoty (tab. 10) jsou srovnávány s výsledky ze speciálního zařízení.

Výsledná hodnota koeficientu opotřebení pro bronzovou slitinu testovanou na speciálním metodikou Start-Stop je $0,061 \cdot 10^{-16}$ se směrodatnou odchylkou (σ) $\pm 0,015 \cdot 10^{-16}$. Jedná se o hodnotu aritmetického průměru (\bar{x}) vytvořeného z 6 testů. Variační koeficient (v_x) se rovná 24 %. Při srovnání této hodnoty s hodnotou aritmetického průměru pro jednotlivá zatížení zjistíme, že hodnota se řádově nejvíce blíží k hodnotě $0,0803 \cdot 10^{-16}$ pro zatížení 420 N. Pro tento soubor dat vyšel variační koeficient 20 %, který je o 4 % procenta nižší než u testů na speciálním zařízení. Tento rozdíl byl způsoben srovnáním souborů dat s různým počtem hodnot a také chybou měření. Rozdíl je však zanedbatelný. Pro zatížení 200N vyšel aritmetický průměr o řád menší než u síly 420 N. Variační koeficient je 43 %, což značí, že během zatížení 200 N se kontakt choval během intervalů zrychlování a zpomalování hřídele více hydrodynamicky, a nedocházelo velkému namáhání povrchu vzorku jako u zatížení 420 N. Naopak pro zatížení 600 N vychází koeficient o 2 řády vyšší. Během Start-stop cyklu muselo docházet k jinému tribologickému chování kontaktu (kontakt se delší dobu pohyboval v mezním a smíšeném režimu mazání) a z toho důvodu součinitel opotřebení vyšel výrazně vyšší.

Tab. 10 Výsledné hodnoty koeficientu opotřebení pro kontaktní tlak 10,1; 15,5 a 19,9 MPa.

Koeficient opotřebení k [10^{-16}]			
Kontaktní tlak	10,1	15,5	19,9
Test č.1	0,0059	0,0738	1,5531
Test č.2	0,0076	0,0591	1,6176
Test č.3	0,0142	0,0981	1,9984
$\bar{x} \pm \sigma$	$0,0092 \pm 0,004$	$0,0803 \pm 0,015$	$1,723 \pm 0,196$
v_x (%)	43	20	11,3

Výsledné hodnoty koeficientu opotřebení Start-Stop testů jsou zobrazeny v tab. 11. Testy byly provedeny pro zmíněné 3 typy materiálů, z nichž nejvyšší hodnotu koeficientu opotřebení má hliníková slitina. Aritmetický průměr koeficientu opotřebení a směrodatné odchylka pro tuto slitinu jsou rovny hodnotě $3,32 \cdot 10^{-16} \pm 0,34 \cdot 10^{-16}$. Variační koeficient je roven hodnotě 10,2 %. Slitina bismutu a stříbra má průměrnou hodnotu koeficientu přibližně o řád nižší než hliníková slitina. Hodnota vyšla $0,48 \cdot 10^{-16} \pm 0,15 \cdot 10^{-16}$. Variační koeficient dosahuje hodnoty 38 %, skoro 4x větší než u Al-slitiny. Variabilita tohoto souboru dat je hodně vysoká. U bronzové slitiny vyšel koeficient $0,07 \cdot 10^{-16} \pm 0,017 \cdot 10^{-16}$, a to znamená, že bronzová slitina má ze všech 3 materiálů nejvyšší odolnost proti oťeru. Koeficient je přibližně o řád nižší než u slitiny bismutu a stříbra, a o 2 řády nižší než u hliníkové slitiny.

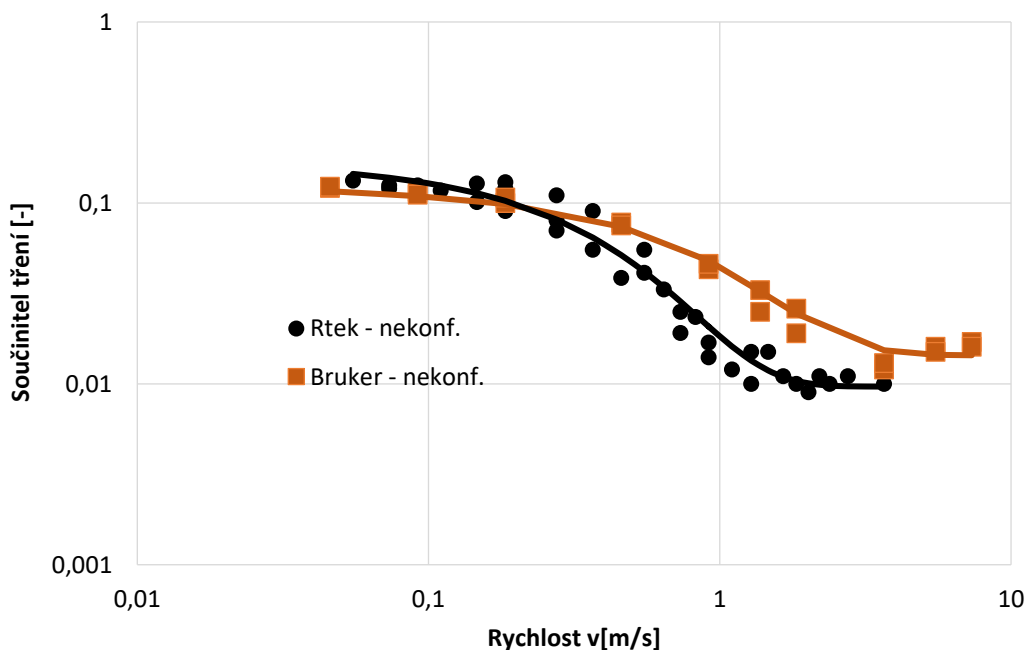
Tab. 11 Výsledné hodnoty Start-Stop testů provedených na konformní konfiguraci Block-on-Ring.

Start-Stop	Součinitel opotřebení k - [10^{-16}]					
	Konf. konfigurace B-on-R - Bruker			Speciální zařízení		
Materiál	Al slitina	Bi+Ag	Bronz	Al slitina	Bi+Ag	Bronz
Test č.1	3,595	0,340	0,088	1,113	0,182	0,076
Test č.2	3,090	0,594	0,072	1,040	0,207	0,064
Test č.3	3,032	0,612	0,035	1,145	0,181	0,078
Test č.4	2,859	0,279	0,077	1,105	0,370	0,053
Test č.5	3,750	0,663	0,069	1,186	0,173	0,038
Test č.6	3,593	0,366	0,079	1,134	0,347	0,066
\bar{x}	3,32	0,48	0,07	1,116	0,251	0,061
$\pm \sigma$	$\pm 0,337$	$\pm 0,15$	$\pm 0,017$	$\pm 0,039$	$\pm 0,082$	$\pm 0,015$
v_x (%)	10,2	38	28,4	3,5	29	24

6.1 Nekonformní konfigurace Block-on-Ring

Na nekonformní konfiguraci Block-on-Ring byly provedeny testy opakovatelnosti. Tyto testy měly stanovit, zda konfigurace je vhodná udávat stejné výsledky pro opakující se testy, které mají stejné vstupní podmínky. Variabilita výsledků se měnila s variačním koeficientem 27 %. Tento rozptyl není vhodný pro porovnávání materiálových charakteristik kluzných ložisek, jelikož by výsledky mohli být výrazně zkreslené chybou měření. Na základě tohoto zjištění byly provedeny konstrukční úpravy tribometru, které snížili chybovost výsledků opotřebení z 27 procent na 9 procent. Došlo také k výraznému zmenšení opotřebované oblasti. Součinitel byl před konstrukční úpravou měřen snímačem třecí síly přes testovaný vzorek. Měření třecího momentu vykazuje vyšší hodnoty tření, než snímač třecí síly. Tento rozdíl je způsoben tím, že rameno silového senzoru je umístěno na čepu a nemusí ideálně dolehnout na testovací kroužek.

Srovnání koeficientu tření pro obě zařízení s nekonformní konfigurací je zobrazeno na obr. 42. Koeficient tření nekonformní konfigurace Rtek s rostoucí rychlostí klesá pro strměji než u konfigurace Bruker. Tento fakt lze vysvětlit tím, že konstrukce snímače třecí síly není vhodná k měření součinitele tření, jelikož musí docházet ke ztrátám měřené hodnoty. Nekonformní konfigurace Block-on-Ring Bruker dosahuje vyššího tření za vyšších rychlostí než 0,27 m/s, avšak při nižších rychlostech dochází ke stejnému tření jako u Rteku.



Obr. 42 Srovnání Stribekovy křivky - Rtek, Bruker

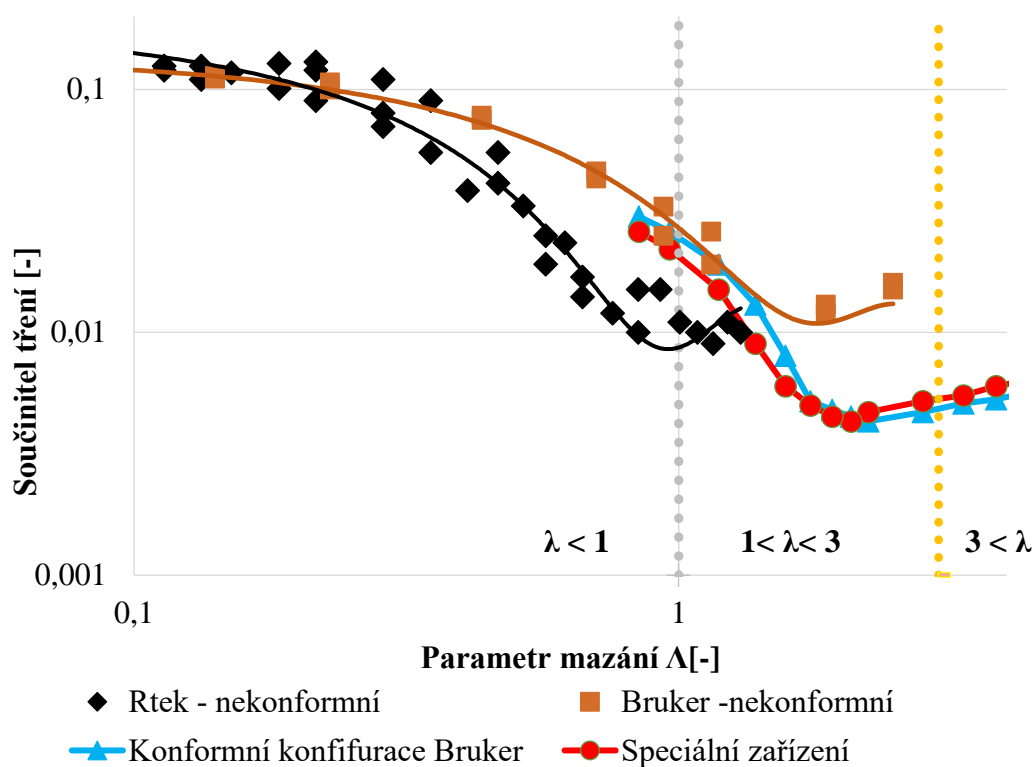
Nekonformní konfigurace obou zařízení byly srovnávány také na základě velikosti opotřebení. Nejmenšímu objemu opotřebovaného materiálu bylo docíleno po konstrukčních úpravách Rteku. Variační koeficient je 8 %. Tato konfigurace je nejvhodnější pro testování nekonformního kontaktu.

Test opakovatelnosti			
	V (mm ³)	w (10 ⁻⁵ mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹)	Variační koeficient (%)
Rtek - před úpravou	0,0418	0,5063	26,6
Rtek - po úpravě	0,0019	0,0226	8,8
Bruker	0,0158	0,3829	15,2

Tab. 12 Srovnání opotřebení pro jednotlivé konfigurace.

6.3 Srovnání chování jednotlivých konfigurací

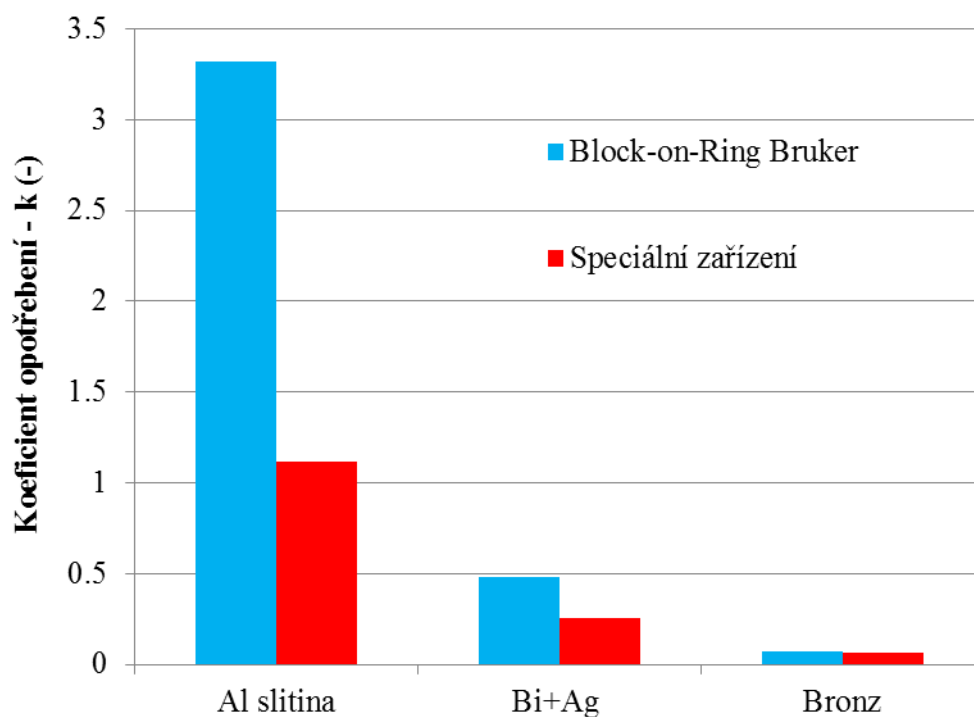
Nekonformní a konformní konfigurace Block on Ring byly srovnány na základě součinitele tření. Bylo zjištěno, že na nekonformní konfigurace se chovají výrazně odlišně než třecí kontakt speciálního zařízení (obr. 43). Na základě tohoto srovnání byla vybrána konformní konfigurace Block on Ring jako nejvhodnější pro nastavení stejných podmínek jako na speciálním zařízení.



Obr. 43 Srovnání jednotlivých konfigurací na základě naměřených hodnot tření.

6.2 Konformní konfigurace Block-on-Ring

Na konformní konfiguraci byla prováděna Start Stop metodika, a výsledky opotřebení byly srovnávány s výsledky na speciálním zařízení. Z grafu na obr. 44 lze vidět, že výsledky koeficientu opotřebení vyšly řádově stejně jako na speciálním zařízení, ale hodnoty koeficientu vyšly vyšší než na speciálním zařízení. Tento rozdíl je dán odlišného mazání kontaktu. Na Block on Ring konfiguraci dochází k mazání broděním, ale u speciálního zařízení je mazivo čerpáno přímo do kontaktu hřídele a ložiska.



Obr. 44 Srovnání výsledků konformní konfigurace Block on Ring - Bruker a speciálního zařízení

7 ZÁVĚR

7

Práce se zabývá experimentálním srovnáním nekonformní a konformní Block on Ring konfiguraci se speciálním zařízením na testování kluzných ložisek. Ke srovnání byly nejdříve analyzovány tribologické podmínky chování v jednotlivých kontaktech, a toto chování bylo následně experimentálně ověřeno. Jako nejvýhodnější konfigurací pro provádění Start-Stop testů byla stanovena konformní konfigurace Block on Ring, na které lze nastavit obdobné chování jako na speciálním zařízením. Na této konfiguraci byly provedeny série testů, které byly srovnány se speciálním zařízením. Lze říct, že na konformní konfiguraci Block-on-Ring lze testovat vzorky kluzných ložisek tak, aby Start Stop test probíhal za podobných tribologických podmínek jako na speciálním a výsledky jsou srovnatelné pro více materiálů. Cíle práce byly tedy splněny.

8 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Ciulli E. (2001) Friction in Lubricated Contacts: from Macro- to Microscale Effects. In: Bhushan B. (eds) Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro- and Micro/Nanoscales. NATO Science Series (Series II: Mathematics, Physics and Chemistry), vol 10. Springer, Dordrecht
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021426290.
- [3] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0-7506-7836-0.
- [4] CAMERON, K., *Ask Kevin: How Are fracture-Split Connecting Rods Made?* [online]. © 2017 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.cycleworld.com/2014/05/26/ask-kevin-how-are-fracture-split-connecting-rods-made>
- [5] GETRETSADIK, D., J. HARDELL, B. PRAKASH. Seizure behaviour of some selected Pb-free engine bearing materials under lubricated condition. *Tribology International*. 2017, **111**(-), 265-275.
- [6] LALBONDRE, R., R. MANU, P. KRISHNA, et al. Machinability of Bearing Steels by Face Turning. *IJSER journal*. 2012. ISSN 2229-5518.
- [7] KRUŽÍK, P. Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 38 s., 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [8] CSB Slide Bearing Specialist. Automobile. [online]. © 2017 Dostupné z: <http://en.csb.com.cn/application/i=27&comContentId=27.html>
- [9] KUČERA, P. *Konstrukce a realizace zařízení pro testování kluzných ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.
- [10] GEBRETSADIK, Daniel W., Jens HARDELL a Braham PRAKASH. Friction and wear characteristics of different Pb-free bearing materials in mixed and boundary lubrication regimes. *Wear* [online]. 2015, **340–341**, 63–72. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.06.002

- [11] RAIMONDI, A A a John BOYD. A Solution for the Finite Journal Bearing and its Application to Analysis and Design: I. *A S L E Transactions* [online]. 1958, **1**(1), 159–174. ISSN 0569-8197. Dostupné z: doi:10.1080/05698195808972328
- [12] GOHAR, R. *Elastohydrodynamics* [online]. B.m.: Imperial College Press, 2001. Computing in Engineering. ISBN 9781860941702. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=AesBxowpka8C>
- [13] MACHINERY LUBRICATION.[online] © 2016 Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/586/viscosity-coefficient-bearing>
- [14] NANOVEA[online] © 2016 Dostupné z: <https://nanovea.com/App-Notes/block-on-ring.pdf>
- [15] PROFITO, F. J., S.-C. VLADESCU, T. REDDYHOFF a D. DINI. Experimental Validation of a Mixed-Lubrication Regime Model for Textured Piston-Ring-Liner Contacts. *Materials Performance and Characterization*[online]. 2017, 6(2), MPC20160019- [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1520/MPC20160019. ISSN 21653992. Dostupné z: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?MPC20160019>
- [16] WEN, Shizhu a Ping HUANG. Principles of tribology. 2nd edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 9781119214892.
- [17] MASJEDI, M. a M. M. KHONSARI. Film Thickness and Asperity Load Formulas for Line-Contact Elastohydrodynamic Lubrication With Provision for Surface Roughness. *Journal of Tribology* [online]. 2012, 134(1), 011503- [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1115/1.4005514. ISSN 07424787. Dostupné z: <http://Tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468861>
- [18] CHUN, Sang Myung a Michael M. KHONSARI. Wear simulation for the journal bearings operating under aligned shaft and steady load during start-up and coast-down conditions. *Tribology International* [online]. 2016, **97**, 440–466. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.01.042
- [19] GAO, F., R. LIU a X. J. WU. Tribaloy alloy reinforced tin-bronze composite coating for journal bearing applications. *Thin Solid Films* [online]. 2011, **519**(15), 4809–4817. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2011.01.035
- [20] MOSHKOVICH, A., V. PERFILYEV, I. LAPSKER a L. RAPOPORT. Stribeck curve under friction of copper samples in the steady friction state. *Tribology Letters* [online]. 2009, **37**(March 2014), 645–653. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-009-9562-z

- [21] LIGTERINK, D. J. a A. W.J. DE GEE. Measurement of wear in radial journal bearings. *TriboTest* [online]. 1996, **3**(1), 45–54. ISSN 13544063. Dostupné z: doi:10.1002/tt.3020030104
- [22] STACHOWIAK, Gwidon. Peter J. Blau: Tribosystem Analysis. *Tribology Letters* [online]. 2017, **65**(4), - [cit. 2018-05-12]. DOI: 10.1007/s11249-017-0919-4. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-017-0919-4>
- [23] STRAFFELINI, Giovanni. *Friction and Wear* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [cit. 2018-05-12]. Springer Tracts in Mechanical Engineering. ISBN 978-3-319-05893-1.
- [24] Damage Equivalent Test Methodologies as Design Elements for Journal Bearing Systems. *Lubricants* [online]. 2017, **5**(4), 47- [cit. 2018-05-14]. DOI: 10.3390/lubricants5040047. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2075-4442/5/4/47>
- [25] *Friction and wear: methodologies for design and control*. S.l.: Springer International Pu, 2015. ISBN 9783319058931.
- [26] FARFÁN-CABRERA, Leonardo Israel a Ezequiel Alberto GALLARDO-HERNÁNDEZ. Wear evaluation of journal bearings using an adapted micro-scale abrasion tester. *Wear* [online]. 2017, **376–377**, 1841–1848. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2016.11.049
- [27] LIU, Rong, Qi YANG a Feng GAO. Tribological Behavior of Stellite 720 Coating under Block-on-Ring Wear Test. *Materials Sciences and Applications* [online]. 2012, **03**(11), 756-762 [cit. 2018-05-17]. DOI: 10.4236/msa.2012.311110. ISSN 2153-117X. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/msa.2012.311110>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9

F	(N)	Normálová síla
G	(-)	Bezrozměrný parametr materiálu
h_{\min}	(m)	Minimální tloušťka mazacího filmu
k	(-)	Součinitel opotřebení
N	(-)	Celkový počet otáček hřídele testu/celkový počet opakování
p_m	(MPa)	Měrný tlak
r	(m)	poloměr hřídele
R_q	(μm)	Redukovaná drsnost třecích povrchů
S	(m)	Skluzová vzdálenost
S_{konf}	(-)	Stribeckovo číslo pro konformní kontakt
S_{nekonf}	(-)	Stribeckovo číslo pro nekonformní kontakt
S_{oknf}	(-)	Sommerfeldovo číslo pro konformní kontakt
S_{onekonf}	(-)	Sommerfeldovo číslo pro nekonformní kontakt
U	(-)	Bezrozměrný parametr rychlosti
V	(mm^3)	Odebraný materiál
w	($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$)	Wear rate
W	(-)	Bezrozměrný parametr zatížení
$\Delta r, c$	(m)	Radiální vůle klzného ložiska
η	(Pas)	Dynamická viskozita maziva
Λ	(-)	Parametr mazání
l	(m)	Délka vzorku
g_v	(-)	Bezrozměrný parametr viskozity
g_e	(-)	Bezrozměrný parametr elasticity
H_{\min}	(-)	Bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu
g_i	(-)	Bezrozměrný parametr
$\bar{\sigma}$	(-)	Bezrozměrný parametr drsnosti
V	(-)	Bezrozměrný parametr tvrdosti
hd	(MPa)	Tvrdost dle Vickerse
E'	(MPa)	Redukovaný modul pružnosti
R'	(m)	Redukovaný poloměr křivosti
α	(rad)	Úhel od hranice opotřeбенé oblasti ke středu hřídele
b	(m)	Šířka opotřeбенé oblasti
δ	(-)	Relativní hloubka opotřeбенí
ζ	(rad)	Úhel od hranice opotřeбенé oblasti ke středu ložiska
α_{oil}	(Pa^{-1})	Tlakovo-viskozní koeficient
p_{\max}	(MPa)	Kontaktní tlak

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Ojnice s kluzným ložiskem [4].....	13
Obr. 2 Jednotlivé úrovně testování kluzných ložisek	14
Obr. 3 Schodovitý nárůst zatížení během testu [5].....	15
Obr. 4 Průběh testu Start-Stop [9], Nárůst tření v závislosti na zvětšení rychlosti hřídele [15]..	16
Obr. 5 Rostoucí opotřebení ložiska během průběhu Start-Stop testu [15].	16
Obr. 6 Stribeckova křivka vyjadřuje přechod mezi stabilním a nestabilním mazáním [2].	17
Obr. 7 Stribeckova křivka popisující jednotlivé režimy mazání mazaného tribologického kontaktu [22].	18
Obr. 8 Rozdíl mezi celým a částečným ložiskem výpočtového modelu [11].....	20
Obr. 9 Kontakt menšího válce s vnitřním větším válcem. [12]	20
Obr. 10 Závislost tlak-viskozního koeficientu na teplotě pro jednotlivé druhy olejů [13].	21
Obr. 11 Srovnání jednotlivých přístupů výpočtu minimální tloušťky mazacího filmu (povrch je uvažován jako ideálně hladký, $\sigma = 0$) [17].....	23
Obr. 12 a)Výsledný tvar opotřebení u nekonformního kontaktu Block-on-Ring, [14] b)průběh hloubky opotřebení více materiálů pro konformní kontakt [19].	24
Obr. 13 a) Závislost objemu odebraného materiálu na skluzové vzdálenosti [26] b) Nárůst koeficientu "Wear rate" a součinitele tření v závislosti na tzv. Schipperově čísle Z [20]	25
Obr. 14 Schéma znázorňující odstranění materiálu opotřebením v pouzdru ložiska pro stacionární kontakt [21]	26
Obr. 15 Srovnání součinitele tření pro jednotlivé materiály testované v mezním režimu mazání [10].	27
Obr. 16 Závislost teploty vzorku konfigurací Block-on-Ring na zatížení vzorku. [27].	27
Obr. 17 Schéma postupu testování práce.....	29
Obr. 18 Schéma konfigurace Block-on-ring – tribometr Rtec.....	30
Obr. 19 Srovnání mkp analýzy se skutečnou tuhostí plechů suspensionu.....	32
Obr. 20 Schéma konstrukční úpravy uchycení vzorku.	32
Obr. 21 Nové uchycení vzorku - Rtec	33
Obr. 22 Schéma zařízení Bruker s konfigurací Block-on-Ring [10]	34
Obr. 23 Zařízení sloužící k testování kluzných ložisek spalovacích motorů [9].....	34
Obr. 24 a) testovací vzorek pro nekonformní konfiguraci Block-on-Ring,- Bruker b) Testovací vzorek pro nekonformní konfiguraci Block-on-Ring. - Rtec.....	35
Obr. 25 Testovací vzorek pro konformní kontakt.....	35
Obr. 26 Měření vzorku na profilometru.....	36
Obr. 27 Srovnání jednotlivých teorií výpočtu minimální tloušťky mazacího filmu pro konformní kontakt Block-on-Ring.....	37
Obr. 28 Srovnání tribologického chování jednotlivých konfigurací.	38
Obr. 29 Měření Stribeckovy křivky - Rtec	39
Obr. 30 Tvar a velikost opotřebené oblasti vzorku.....	40
Obr. 31 Srovnání součinitele tření pro testy opakovatelnosti – Rtec.....	40
Obr. 32 Srovnání opotřebení jednotlivých testů - rtec po úpravě.	42
Obr. 33 Stribeckova křivka - Bruker	42

Obr. 34 Koeficient tření - Bruker	43
Obr. 35 Srovnání Stribeckových křivek všech konfigurací.....	44
Obr. 36 Naměřená data Stribeckovy křivky - Speciální zařízení, Bruker konformní. .	45
Obr. 37 Srovnání Stribeckových křivek pro Full Scale zařízení a konformní varianty Block on Ring.....	46
Obr. 38 a) Srovnání koeficientu tření s koeficientem opotřebení pro jednotlivé rychlosti z intervalu 0 - 1 m/s, b) Opotřebení materiálu A22E pro jednotlivé rychlosti.	47
Obr. 39 Koeficient opotřebení v závislosti na různé době testu pro testovací podmínky: 420N, 0,28 m/s a stejný materiál (Hliníková slitina).....	48
Obr. 40 Závislost součinitele tření pro testy s konstantním zatížením, a pro jednotlivé rychlosti (červená - 0,27 m/s, azurová/hnědá/zelená = 0,55 m/s).	49
Obr. 41 Průběh Start-stop testu.	50
Obr. 42 Srovnání Stribeckovy křivky - Rtec, Bruker.....	52
Obr. 43 Srovnání jednotlivých konfigurací na základě naměřených hodnot tření.	53
Obr. 44 Srovnání výsledků konformní konfigurace Block on Ring - Bruker a speciálního zařízení	54

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Naměřená drsnost jednotlivých materiálů ložisek.....	35
Tab. 2 Opotřebení R_{tec} - před úpravou.....	39
Tab. 3 Srovnání součinitele tření – R_{tec} – před úpravou.....	40
Tab. 4 Srovnání opotřebení R_{tec} - po úpravě	41
Tab. 5 Srovnání součinitele tření pro testy opakovatelnosti – R_{tec} po úpravě.....	41
Tab. 6 Opotřebení - Bruker.....	43
Tab. 7 Parametry testování - Bruker - konformní varianta.....	45
Tab. 8 Zprůměrované hodnoty součinitele opotřebení pro jednotlivé testy s odlišnými rychlostmi.	48
Tab. 9 Parametry testování -Start-Stop test- Bruker.....	49
Tab. 10 Výsledné hodnoty koeficientu opotřebení pro kontaktní tlak 10,1; 15,5 a 19,9 MPa.....	51
Tab. 11 Výsledné hodnoty Start-Stop testů provedených na konformní konfiguraci Block-on-Ring.	51
Tab. 12 Srovnání opotřebení pro jednotlivé konfigurace.	53

12 SEZNAM PŘÍLOH

12

Příloha 1 LOVECEK, L. Experimental testing of journal bearings